



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI NUMERIK ALIRAN FLUIDA MELEWATI  
DIFFUSER DENGAN VARIASI BENTUK DAN  
BILANGAN REYNOLDS UNTUK APLIKASI INLET  
DUCT HRSG**

CRYTELANA RADIOS CATUR PUTRI  
NRP. 2111100017

Dosen Pembimbing:  
Vivien Suphandani, ST., M.Eng., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2015



FINAL PROJECT – TM141585

**NUMERICAL STUDY OF FLUID FLOW THROUGH  
DIFFUSER WITH SHAPE VARIATION OF  
DIFFUSER AND REYNOLDS NUMBER FOR  
APPLICATION OF INLET DUCT HRSG**

CRYTELANA RADIOS CATUR PUTRI  
NRP. 2111100017

Advisory Lecturer  
Vivien Suphandani, ST., M.Eng., Ph.D

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2015

## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI NUMERIK ALIRAN FLUIDA MELEWATI DIFFUSER DENGAN VARIASI BENTUK DAN BILANGAN REYNOLDS UNTUK APLIKASI INLET DUCT HRSG

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**CRYTELANA RADIOS CATUR PUTRI**

Nrp. 2111 100 017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, ST, M.Eng, Ph.D .....(Pembimbing)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D .....(Penguji I)
3. Nur Ikhwan, ST, M.Eng .....(Penguji II)
4. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT .....(Penguji III)

**SURABAYA**  
**Juli 2015**

# STUDI NUMERIK ALIRAN FLUIDA MELEWATI DIFFUSER DENGAN VARIASI BENTUK DAN BILANGAN REYNOLDS UNTUK APLIKASI INLET DUCT HRSG

**Nama Mahasiswa** : Crytelana Radios Catur Putri  
**NRP** : 2111 100 017  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen pembimbing** : Vivien Suphandani, ST, M.Eng, Ph.D

## ABSTRAK

*Fluida merupakan suatu hal yang penting maka penelitian mengenai karakteristik fluida dan pengendalian karakteristik fluida sangat penting dilakukan. Diffuser merupakan salah satu konstruksi yang dapat mengendalikan perilaku dari fluida, salah satu aplikasi dari diffuser adalah inlet duct pada HRSG (Heat Recovery Steam Generator). Pada HRSG aliran setelah melewati inlet duct diharapkan dapat memiliki kecepatan aksial yang uniform, namun dalam operasinya aliran yang keluar dari inlet duct belum mencapai kecepatan yang uniform. Maka diperlukan upaya yaitu dengan memvariasikan bentuk diffuser yang akan diaplikasikan pada inlet duct.*

*Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kontur kecepatan, kontur tekanan, streamline, root mean square (RMS), pressure recovery coefficient ( $C_{p,r}$ ), dan pressure loss coefficient ( $K$ ) dari empat model bentuk diffuser dengan penambahan porous medium pada jarak 3229 mm dari outlet diffuser, dimana masing-masing diffuser memiliki panjang yang sama sebesar 8400 mm. Empat model tersebut diantaranya asymmetric diffuser ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ), asymmetric diffuser dengan satu sudden enlargement ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ ), symmetric diffuser ( $2\theta=88,08^\circ$ ), dan symmetric diffuser dengan dua sudden enlargement ( $2\theta=33,4^\circ$ ). Penelitian ini menggunakan tiga bilangan Reynolds yaitu  $Re_1 = 8 \times 10^5$ ,  $Re_2 = 1,6 \times 10^6$  dan  $Re_3 = 3,2 \times 10^6$*

*berdasarkan kecepatan freestream memasuki upstream channel pada diffuser dengan metode numerik 3 dimensi steady flow menggunakan software STAR-CCM+ dengan model turbulensi realizable k-epsilon.*

*Hasil yang diperoleh dari penelitian menunjukkan bahwa model 3 merupakan model yang paling optimum karena memiliki kecepatan yang paling uniform ditunjukkan nilai RMS yang paling rendah, performa diffuser yang paling baik ditunjukkan dengan nilai pressure recovery coefficient ( $C_{p_r}$ ) yang paling tinggi dan memiliki nilai pressure loss coefficient ( $K$ ) yang paling rendah. Kenaikan bilangan Reynolds tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai RMS,  $C_{p_r}$  dan  $K$  pada keempat model.*

***Kata kunci : Diffuser, inlet duct HRSG, kecepatan aksial uniform, porous medium, variasi bentuk***

# NUMERICAL STUDY OF FLUID FLOW THROUGH DIFFUSER WITH SHAPE VARIATION OF DIFFUSER AND REYNOLDS NUMBER FOR APPLICATION OF INLET DUCT HRSG

**Name** : Crytelana Radios Catur Putri  
**NRP** : 2111 100 017  
**Department** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Advisor** : Vivien Suphandani, ST, M.Eng, Ph.D

## ABSTRACT

*Fluid is an important thing in this world, the research about fluid, characteristic of fluid and how to control the characteristic of fluid important to do. Diffuser is one of construction which can control of fluid. One of application of diffuser is inlet duct HRSG (Heat Recovery Steam Generator). In HRSG the flow after through the inlet duct expected has uniform aial velocity, but in operation the flow which left from inlet duct has not uniform flow. So need some action to make the uniform flow, one of the action make the shape variation of diffuser in inlet duct HRSG.*

*The aims of this research is comparing of velocity contour, pressure contour, streamline, root mean square (RMS), pressure recovery coefficient ( $C_{p,r}$ ) and pressure loss coefficient ( $K$ ) distribution of four models of shape diffuser with adding porous medium at 3229 mm after outlet diffuser, which have same long of diffuser 8400 mm, four models are asymmetric diffuser ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ), asymmetric diffuser with one sudden enlargement ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ ), symmetric diffuser ( $2\theta=88,08^\circ$ ), and symmetric diffuser with two sudden enlargement ( $2\theta=33,4^\circ$ ). This research used three Reynolds number are  $Re_1 = 8 \times 10^5$ ,  $Re_2 = 1,6 \times 10^6$  and  $Re_3 = 3,2 \times 10^6$  based on free stream velocity through upstream channel of diffuser with numeric method 3*

*dimension steady flow using STAR-CCM+ software with realizable k-epsilon turbulence model.*

*The results of this research that model 3 symmetric diffuser with two sudden enlargement ( $2\theta=33,4^\circ$ ) is an optimum model, because model 3 has uniform axial velocity with the lowest RMS, the best diffuser perform with the highest Cpr and has the lowest pressure loss coefficient. Increasing Reynolds number has not significant effect towards to RMS, Cpr and K for the four models.*

***Kata kunci : Diffuser, inlet duct HRSG, uniform axial velocity, porous medium, shape variation of diffuser.***

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar tanpa ada halangan yang berarti dan dapat selesai tepat waktu. Tugas akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik bidang studi konversi energi jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang membantu dan mendukung dalam penulisan Tugas Akhir ini :

1. Ayah dan Mamah tercinta yang selalu mendukung, memberikan semangat dan senantiasa mendoakan penulis selama penulis menuntut ilmu di ITS sampai penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Adik-adik tersayang Pipit, Predib dan Pino yang menjadi semangat dan motivasi penulis.
3. Ibu Vivien Suphandani, ST, M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah memberikan bimbingan dan ilmu dengan sabar dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D, Bapak Nur Ikhwan ST, M.Eng. serta Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan saran dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D selaku dosen wali penulis yang banyak memberikan saran dan motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Saudaraku terkasih Yulia Fahriana Handayani yang telah menjadi partner terbaik dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, tutor belajar terbaik dalam masa perkuliahan selama 4 tahun, dan menjadi sahabat



terkeren yang bersedia mendengarkan keluh kesah penulis dengan sabar dan memberikan semangat.

7. Teman – teman Pasukan Bu Vivien Fajar (Sindo), Haykal, Nana, Fauzi dan Gerald yang telah memberikan banyak informasi, motivasi dan dukungan kepada penulis.
8. Para Pejuang Laboratorium CAE Dinar, Andik, Fahmi Goreng, Saringadi dan Pak Dani yang selalu berbagi semangat dan menemani selama *running*.
9. Warga Laboratorium Mekanika Fluida Salma, Erin, Ina, Uma, Fahmi, Dimas, Tsabit, Sariadi, Adit, Nando, Benyamin, Verdy, Mas Sudahra, Mas Taufiq, Kak Peter yang telah menghibur, memberikan semangat, mendukung dan memberikan saran selama pengerjaan Tugas Akhir.
10. Teman–teman angkatan M-54 yang telah memberikan warna tersendiri selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Teknik Mesin ITS.
11. Ciwi–ciwi genk J-23 Yulia, Leli, Nadia, Ajeng, Choir, dan Nilna teman kos terbaik yang selalu menghibur dan menemani penulis selama penulis berada di Surabaya

Dengan segala keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna, maka dengan senang hati penulis bersedia menerima kritik dan saran demi sempurnanya Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak

Surabaya, Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Dasar Teori .....	5
2.1.1 <i>Inlet Duct</i> HRSG .....	5
2.1.2 <i>Diffuser</i> .....	7
2.1.3 <i>Pressure Coefficient dan Pressure Recovery</i> <i>Coefficient</i> .....	10
2.2 Penelitian Terdahulu.....	12
2.2.1 Param, et al.....	12
2.2.2 Hegde, et al.....	15
2.2.4 Wang, et al.....	17
2.2.5 Wardhana.....	19
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	25
3.1 Tahap-tahap Penelitian .....	25

3.2 Parameter yang Dianalisa .....	26
3.3 Metode Numerik.....	28
3.3.1 Tahap <i>Pre-processing</i> .....	28
3.3.1.1 Geometri dan Pemodelan <i>Diffuser</i> .....	28
3.2.1.2 <i>Meshing</i> .....	32
3.3.2 Tahap <i>Processing</i> .....	32
3.3.2.1 Pemilihan <i>Turbulence Modell</i> .....	32
3.3.2.2 <i>Operating Condition</i> .....	33
3.3.2.3 <i>Boundary Condition</i> .....	33
3.2.2.4 <i>Solution</i> .....	35
3.2.2.5 <i>Initialize</i> .....	35
3.2.2.6 <i>Monitor Residual</i> .....	35
3.2.2.7 <i>Iterate</i> .....	35
3.3.3 Tahap <i>Post-Processing</i> .....	36
3.3.4 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	36
 <b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN</b> .....	39
4.1 Spesifikasi <i>Porous Medium</i> pada HRSG.....	39
4.2 <i>Grid Independency</i> .....	40
4.3 Titik Pengambilan Data .....	43
4.4 Analisa Kualitatif.....	44
4.4.1 Analisa Kontur Kecepatan ke Arah Z Bidang X .....	44
4.4.2 Analisa Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z .....	49
4.4.3 Analisa Kontur dan Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z .....	52
4.4.4 Analisa <i>Streamline</i> ke arah Z .....	59
4.4.5 Analisa Kontur Tekanan ke Arah Z.....	61
4.4.6 Analisa Kontur Tekanan ke arah X .....	63
4.5 Analisa Kualitatif.....	65

4.5.1 Analisa RMS ( <i>Root Mean Square</i> ).....	68
4.5.2 Analisa <i>Pressure coefficient recovery</i> ( $C_{p_r}$ ).....	71
4.5.3 Analisa <i>Pressure Loss Coefficient</i> (K) .....	74
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	77
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran .....	77
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	79
<b>LAMPIRAN</b> .....	81
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	85

*Halaman sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1: Nilai RMS untuk Semua Kasus.....	14
Tabel 2.2 Studi Kasus.....	20
Tabel 2.3 Data kuantitatif kecepatan <i>flue gas</i> pada bidang X koordinat 18.6299.....	23
Tabel 4.1 Spesifikasi dari <i>Porous Medium</i> yang Dilalui <i>Flue Gas</i> Berupa Modul.....	39
Tabel 4.2 <i>Grid Independency</i> untuk Model 1.....	40
Tabel 4.3 <i>Grid Independency</i> untuk Model 2.....	41
Tabel 4.4 <i>Grid Independency</i> untuk Model 3.....	42
Tabel 4.5 <i>Grid Independency</i> untuk Model 4.....	43
Tabel 4.6 Nilai RMS 4 odel pada Masing-masing Re.....	68
Tabel 4.7 Nilai $C_{p,r}$ 4 Model pada Masing-masing Re.....	71
Tabel 4.8 Nilai <i>Pressure Loss Coefficient</i> (K) 4 model pada Masing-masing Re.....	74

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Asymmetric Inlet Duct</i> pada HRSG .....	5
Gambar 2.2 <i>Asymmetric Inlet Duct</i> pada HRSG .....	6
Gambar 2.3 <i>Asymmetric Inlet Duct</i> pada HRSG .....	6
Gambar 2.4 <i>Asymmetric Inlet Duct</i> pada HRSG .....	7
Gambar 2.5 Geometri <i>Flat-walled Diffuser</i> .....	7
Gambar 2.6 a. Aliran Ideal di Dalam <i>Diffuser</i> .....	8
b. Aliran Aktual di Dalam <i>Diffuser</i> .....	8
Gambar 2.7 Peta Kestabilan <i>flat-diffuser</i> dari Fox dan Kline .....	9
Gambar 2.8 Skema 3D HRSG <i>Inlet Duct</i> .....	12
Gambar 2.9 Kecepatan Aliran Aksial untuk Studi Kasus 1 <i>Inlet Duct</i> .....	13
Gambar 2.10 Profil Aliran <i>Flue Gas</i> untuk Semua Kasus <i>Inlet Duct</i> .....	14
Gambar 2.11 Lokasi <i>Perforated Plate</i> dan Lokasi Pengukuran Kecepatan .....	15
Gambar 2.12 Kontur Aliran di Dalam HRSG dengan Lokasi <i>Perforated Plate</i> Berbeda .....	16
Gambar 2.13 Grafik Perbandingan <i>Velocity</i> dengan <i>Perforated Plate</i> di Ujung dan di Tengah <i>Inlet Duct</i> .....	16
Gambar 2.14 Skema dari Aliran <i>Diffuser</i> .....	17
Gambar 2.15 Distribusi Kecepatan <i>Symmetric Diffuser</i> pada $Re=500$ .....	18
Gambar 2.16. Grafik Hubungan <i>Diverging Angle</i> terhadap <i>TotalLoss Coefficient</i> .....	18
Gambar 2.17 Kontur Kecepatan X HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0. ....	20
Gambar 2.18 Vektor Kecepatan HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0. ....	22



Gambar 2.19 <i>Pathlines</i> Kecepatan X HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0 Bagian <i>Inlet Duct</i> .....	22
Gambar 2.20 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah X pada Penampang X Koordinat 18.6299 .....	22
Gambar 3.1 Titik Pengambilan Data <i>Pressure Loss Coefficient</i> (K) .....	27
Gambar 3.2 Dimensi Model 1 .....	30
Gambar 3.3 Dimensi Model 2 .....	30
Gambar 3.4 Dimensi Model 3 .....	31
Gambar 3.5 Dimensi Model 4 .....	31
Gambar 3.6 Bentuk Meshing 3D <i>Hexahedral Map</i> Model 1 .....	32
Gambar 3.8 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	37
Gambar 4.1 Grafik <i>Grid Independency</i> Model 1.....	40
Gambar 4.2 Grafik <i>Grid Independency</i> Model 2.....	41
Gambar 4.3 Grafik <i>Grid Independency</i> Model 3.....	42
Gambar 4.4 Grafik <i>Grid Independency</i> Model 4.....	43
Gambar 4.5 Titik Pengambilan Data Model 1 .....	44
Gambar 4.6 Kontur Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	45
Gambar 4.7 Kontur Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	46
Gambar 4.8 Kontur Kecepatan ke arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	47
Gambar 4.9 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe <i>Line</i> dan <i>Streamline</i> pada Model 1.....	48
Gambar 4.10 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe <i>Line</i> dan <i>Streamline</i> pada Model 3.....	48
Gambar 4.11 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	49

Gambar 4.12 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	50
Gambar 4.13 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	50
Gambar 4.14 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe <i>Line</i> dan <i>Streamline</i> pada Model 4 pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	51
Gambar 4.15 <i>Streamline</i> Model 4 pada $Re\ 3,2 \times 10^6 \times 10^6$ .....	52
Gambar 4.16 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	53
Gambar 4.17 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	54
Gambar 4.18 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	55
Gambar 4.19 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	56
Gambar 4.20 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	57
Gambar 4.21 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	58
Gambar 4.22 <i>Streamline</i> ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	59
Gambar 4.23 <i>Streamline</i> ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	60
Gambar 4.24 <i>Streamline</i> ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	60
Gambar 4.25 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	61
Gambar 4.26 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	62
Gambar 4.27 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang <i>Midspan</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	62

Gambar 4.28 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	63
Gambar 4.29 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	64
Gambar 4.30 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	64
Gambar 4.31 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 8 \times 10^5$ .....	66
Gambar 4.32 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 1,6 \times 10^6$ .....	66
Gambar 4.33 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum <i>Porous Medium</i> pada $Re\ 3,2 \times 10^6$ .....	67
Gambar 4.34 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai $Re$ terhadap Nilai RMS pada Model 1, 2, 3 dan 4 .....	69
Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai $Re$ terhadap Nilai $C_{p_r}$ pada Model 1, 2, 3 dan 4 .....	72
Gambar 4.36 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai $Re$ terhadap Nilai $K$ pada Model 1, 2, 3 dan 4 .....	75

## DAFTAR SIMBOL

$\theta$	: Sudut divergensi
$C_p$	: <i>Wall Pressure Coefficient</i> , ( $C_p = \frac{p_{s,i} - p_{s,0}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$ )
$C_{pr}$	: <i>Pressure recovery coefficient</i> , ( $C_{pr} = \frac{p_{s,e} - p_{s,0}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$ )
$p_{s,i}$	: Tekanan statis dinding pada $x/L_I = i$ , Pa
$p_{s,o}$	: Tekanan statis pada <i>inlet diffuser</i> , Pa
$p_{s,e}$	: Tekanan statis pada <i>outlet diffuser</i> , Pa
$Re$	: <i>Bilangan Reynolds</i>
$T$	: Temperatur ruang kerja (°C)
$u$	: Kecepatan lokal, m/s
$U_{ref}$	: Kecepatan <i>freestream</i> pada jarak $x/L_I = 0$ , m/s
$\mu$	: <i>Viskositas absolut udara</i> , N.s/m <sup>2</sup>
$\rho$	: Massa jenis udara, kg/m <sup>3</sup>
RMS	: <i>Root mean square</i> ( $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \xi_i^2}{n}} * 100\%$ ; $\xi_i = \frac{u_i - u_{av}}{u_{av}}$ )
$u_i$	: Kecepatan lokal, m/s
$u_{av}$	: Kecepatan rata-rata, m/s
K	: <i>Pressure Loss Coefficient</i>

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Fluida merupakan suatu hal yang sangat penting dalam kehidupan semua makhluk di bumi, sehingga penelitian mengenai karakteristik fluida dan pengendalian karakteristik fluida sangat penting dilakukan untuk memenuhi berbagai kebutuhan semua makhluk yang ada di bumi. *Diffuser* merupakan salah satu konstruksi yang dapat mengendalikan perilaku dari fluida, setiap jenis *diffuser* memiliki performa dan karakteristik aliran yang berbeda-beda bergantung pada bentuk dan sudut bukaanannya. *Diffuser* merupakan suatu penampang yang mengalami pembesaran luas kearah melintang searah dengan aliran utama fluida. *Diffuser* bekerja dengan cara memperlambat aliran sehingga bentuk salurannya semakin membesar (*diverging*) dan tekanan pada *outlet* lebih besar daripada *inlet*. Pembesaran area dari *diffuser* cenderung menyebabkan penurunan kecepatan dan mengakibatkan peningkatan tekanan pada aliran. Salah satu aplikasi dari *diffuser* adalah *inlet duct* pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), *inlet duct* tersebut yang menentukan bentuk aliran dari *flue gas*.

Pada HRSG tersebut aliran setelah melewati *inlet duct* diharapkan dapat memiliki kecepatan aksial yang seragam atau *uniform* yang bertujuan untuk mengurangi turbulensi *flue gas* dan mengoptimalkan *pressure drop*, karena turbulensi *flue gas* dapat menyebabkan tidak meratanya temperatur aliran karena ada panas yang terkonsentrasi pada suatu titik sehingga dapat mengurangi perpindahan panas yang terjadi antara *flue gas* dan *steam*. Namun dalam operasinya aliran yang keluar dari *inlet duct* belum mencapai kecepatan *uniform* karena terjadinya separasi pada bagian tepi dari *inlet duct*. Maka diperlukan upaya agar aliran yang keluar dari *inlet duct* memiliki kecepatan yang *uniform*, salah satu upaya yang dilakukan yaitu dengan memvariasikan bentuk *diffuser* yang akan diaplikasikan pada *inlet duct* dengan

empat model bentuk *diffuser* dan penambahan *porous medium* pada jarak 3229 mm dari *outlet diffuser*, dimana masing-masing *diffuser* memiliki panjang yang sama sebesar 8400 mm diantaranya *asymmetric diffuser* ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ), *asymmetric diffuser* dengan satu *sudden enlargement* ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ ), *symmetric diffuser* ( $2\theta=88,08^\circ$ ), dan *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* ( $2\theta=33,4^\circ$ ). Pemodelan bentuk *diffuser* ini ingin mengetahui bagaimana pengaruh panjang *diffuser* yang sama dengan bentuk *diffuser* yang berbeda. Model aliran *diffuser* ini disimulasikan secara numerik tiga dimensi dengan *software Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Pemilihan metode penelitian numerik didasarkan beberapa hal yaitu : penelitian dapat dilakukan lebih cepat dan dapat menjelaskan proses yang sulit divisualisasikan saat eksperimen, tanpa melakukan eksperimen secara langsung dapat diperoleh hasil pendekatan dari eksperimen, dan dapat mengetahui hasil kuantitatif pada titik-titik tertentu yang tidak bisa atau sulit didapatkan saat eksperimen.

Param, et al (2011) melakukan sebuah penelitian tentang profil aliran di dalam HRSG saat keluar dari *inlet duct*. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati efek dari bentuk *inlet duct* pada HRSG terhadap profil aliran dari *flue gas* setelah melewati *inlet duct*. Di dalam penelitian ini dilakukan 5 studi kasus untuk dimensi *inlet duct* dan menggunakan *viscous model* standar K- $\epsilon$ . Hegde, et al (2007) melakukan suatu studi numerik membandingkan kontur kecepatan aliran pada inlet duct jika lokasi *perforated plate* di ujung dan di tengah *inlet duct* HRSG untuk mendapat aliran *flue gas* yang lebih *uniform*. Wang, et al (2007) melakukan penelitian mengenai *flat walled microdiffuser valve* dengan *aspect ratio* 0,92, variasi sudut divergensi sebesar  $4^\circ$  -  $120^\circ$  dan bilangan *Reynolds* mulai dari 100 – 1000 yang bertujuan untuk mengetahui distribusi kecepatannya. Wardhana (2014) melakukan studi numerik membandingkan tingkat keseragaman aliran (*uniformity*) dari 3 macam *inlet duct* yang diteliti. *Inlet duct* 1 dengan panjang 8,4m. *Inlet duct* 2 memiliki

panjang 10,811m. *Inlet duct* 3 memiliki panjang 8,4m dan ditambahkan *flow correction device*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini *diffuser* yang akan disimulasikan menggunakan dimensi yang umum digunakan pada *inlet duct* HRSG. Penelitian ini membandingkan hasil analisa numerik pemodelan tiga dimensi mengenai karakteristik aliran melewati *diffuser* dengan penambahan *porous medium* pada jarak 3229 mm dari *outlet diffuser*, dimana masing-masing *diffuser* memiliki panjang yang sama sebesar 8400 mm diantaranya *asymmetric diffuser* ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ), *asymmetric diffuser* dengan satu *sudden enlargement* ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ ), *symmetric diffuser* ( $2\theta=88,08^\circ$ ), dan *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* ( $2\theta=33,4^\circ$ ). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* STAR-CCM+. Hasil yang didapat dari analisa numerik digunakan untuk mengetahui kontur aliran melewati *diffuser* seperti kontur kecepatan, kontur tekanan, *streamline*, *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ), *root mean square* (RMS), dan *pressure loss coefficient* (K).

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Dimensi *diffuser* menggunakan dimensi yang umum digunakan pada *inlet duct* HRSG.
2. Model dari bentuk *diffuser* masing-masing memiliki panjang *diffuser* yang sama yaitu 8400 mm pada  $Re_1 = 8 \times 10^5$ ,  $Re_2 = 1,6 \times 10^6$  dan  $Re_3 = 3,2 \times 10^6$
3. *Flue gas* yang melewati *diffuser* diasumsikan *steady flow*, *incompressible flow*, *density* konstan, viskositas dinamik konstan dan *inertial resistance* konstan.
4. Pengaruh perpindahan panas dan temperatur pada *diffuser* dapat diabaikan
5. Pengaruh kekasaran permukaan pada dinding *diffuser* dapat diabaikan



#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk membandingkan kontur kecepatan, kontur tekanan, *streamline*, *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ), *root mean square* (RMS) dan *pressure loss coefficient* (K) untuk masing-masing bentuk *diffuser*.
2. Untuk mendapatkan data kualitatif berupa visualisasi aliran pada daerah yang diinginkan meliputi kontur kecepatan, kontur tekanan, dan *streamline* untuk masing-masing bentuk *diffuser*.
3. Untuk mendapatkan data kuantitatif berupa *root mean square* (RMS), *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) dan *pressure loss coefficient* (K) untuk masing-masing bentuk *diffuser*.
4. Mengetahui pengaruh *Reynolds number* terhadap nilai *root mean square* (RMS), *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) dan *pressure loss coefficient* (K) untuk masing-masing bentuk *diffuser*.

## BAB II

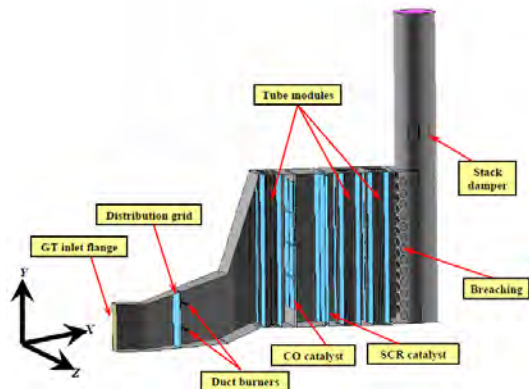
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Dasar Teori

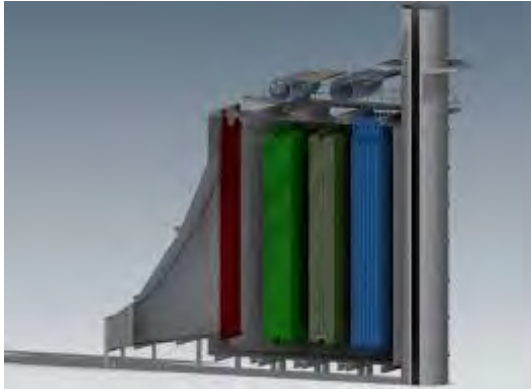
##### 2.1.1 Inlet Duct HRSG

*Inlet duct* adalah bagian pada HRSG yang terhubung ke *gas turbin exhaust flange* dan menyalurkan *flue gas* ke permukaan pemanasan awal. Tujuan utama dari *Inlet duct* ini untuk mendapatkan profil aliran yang seseragam mungkin. Hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan *pressure drop* dan mengurangi turbulensi dari gas sisa karena memiliki kecepatan yang tinggi. Turbulensi dapat menyebabkan tidak meratanya temperatur aliran karena ada panas yang terkonsentrasi pada titik tertentu. Untuk membuat kecepatan aliran yang *uniform* maka dibutuhkan untuk memvariasikan dimensi dari *inlet duct* HRSG. Pada dasarnya bentuk dari *inlet duct* HRSG adalah seperti sebuah *diffuser* dan memiliki bentuk *cross sectional area* berupa *rectangular duct*.

Bentuk-bentuk dari *inlet duct* yang umum digunakan pada HRSG ditunjukkan pada gambar 2.1 sampai 2.4 sebagai berikut :



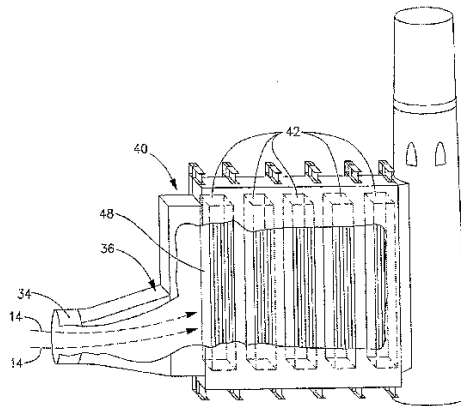
Gambar 2.1 *Asymmetric Inlet Duct* pada HRSG (Vytla, 2005)



Gambar 2.2 *Asymmetric Inlet Duct* pada HRSG (ATCO, 2015)



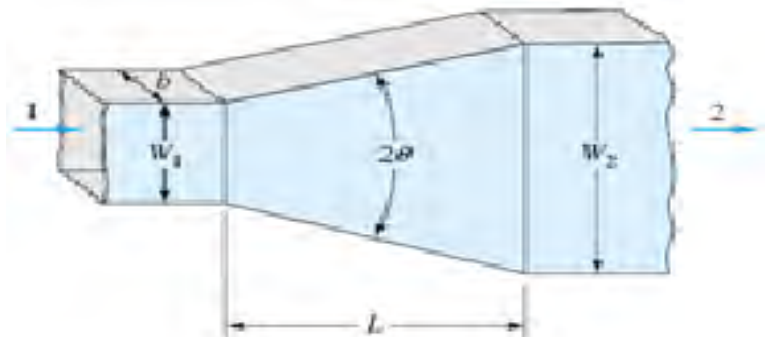
Gambar 2.3 *Assymmetric Inlet Duct* pada HRSG (PLTGU Grati, 1990)



Gambar 2.4 *Asymmetric Inlet Duct* pada HRSG (US Patents, 2011)

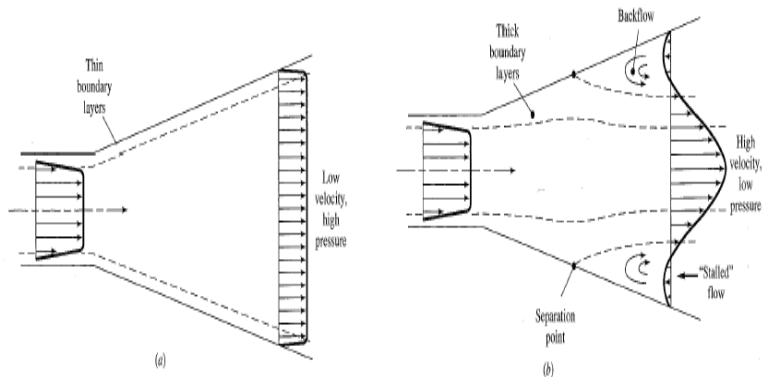
### 2.1.2 Diffuser

*Diffuser* merupakan suatu penampang yang mengalami pembesaran luas kearah melintang searah dengan aliran utama fluida. *Diffuser* bekerja dengan cara memperlambat aliran sehingga bentuk salurannya semakin membesar (*diverging*), tekanan pada *outlet* (2) lebih besar daripada *inlet* (1). Gambar 2.5 menunjukkan bentuk geometri dari *flat-walled diffuser*.



Gambar 2.5 Geometri *Flat-walled Diffuser* (White, 2001)

Pembesaran area dari *diffuser* cenderung menyebabkan penurunan kecepatan dan mengakibatkan peningkatan tekanan pada aliran dan gradien tekanannya menjadi positif searah dengan arah aliran. Momentum dari aliran yang dekat dengan permukaan berkurang akibat dari tegangan geser dan *back pressure*. Semakin jauh jarak yang ditempuh aliran semakin besar pula gradien tekanan yang terjadi. Hal ini menyebabkan fluida tidak mampu lagi melawan gaya gesek dan *adverse pressure gradient* yang terjadi sehingga aliran di dekat permukaan menjadi berbalik arah (*back flow*). Titik dimana aliran mengalami *back flow* disebut titik separasi. Fenomena ini dapat dilihat pada gambar 2.6. Terjadinya *back flow* menyebabkan terjadinya penurunan *performance* dari *diffuser*.

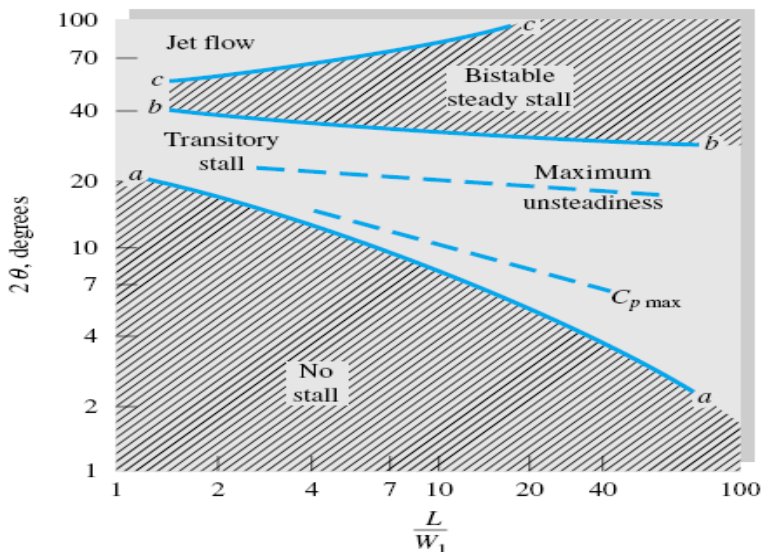


Gambar 2.6 a) Aliran Ideal di Dalam *Diffuser* b) Aliran Aktual di Dalam *Diffuser* (Paul De Jonge, 2012)

Pemilihan jenis dan geometri *diffuser* menentukan performanya. Variabel geometri yang sangat berperan terhadap performa *diffuser* adalah sudut divergensi ( $2\theta$ ), *ratio* panjang *diffuser* terhadap tingginya ( $L/W_1$ ), *area ratio* ( $AR$ ) dan *aspect ratio*. *Area ratio* merupakan perbandingan antara luasan *outlet* dengan luasan *inlet*, sedangkan *aspect ratio* adalah perbandingan

antara  $W_1/b_1$  dengan  $W_2/b_2$ . *Pressure recovery* yang dihasilkan oleh *diffuser* harus mencapai nilai *maksimum* agar tidak terjadi *separasi* sehingga didapatkan performa *diffuser* yang bagus.

Penerbitan peta kestabilan *flat-diffuser* (*flat-diffuser stability map*) oleh Fox dan Kline pada tahun 1962 (White, 2001) dapat digunakan sebagai acuan untuk memilih geometri *diffuser* sehingga dapat meminimalkan efek yang tidak diinginkan dari *adverse pressure gradient* dan separasi aliran. Peta kestabilan tersebut hanya berlaku untuk *diffuser* dengan bentuk *symmetric diffuser*, untuk bentuk *diffuser* yang lain seperti *asymmetric diffuser* tidak dapat menggunakan peta kestabilan tersebut karena akan menunjukkan kondisi yang berbeda dengan kondisi aktualnya. *Asymmetric diffuser* dan bentuk *diffuser* yang lain belum memiliki peta kestabilan.



Gambar 2.7 Peta Kestabilan *Flat-diffuser* dari Fox dan Kline (White, 2001)

Peta kestabilan *flat-diffuser* yang ditunjukkan pada gambar 2.7 dibagi menjadi 4 daerah utama yaitu:

- Daerah *no stall*. Pada daerah ini, *diffuser* memiliki karakteristik aliran yang tidak mengalami separasi dan memiliki performa yang baik.
- Daerah *transitory stall*. Daerah yang merupakan awal mula terjadinya *stall*, namun *stall* hanya berlangsung pada periode waktu yang sangat pendek. Pada daerah ini terjadi performa maksimum pada garis  $C_{p_{maks}}$ . Selain itu juga terdapat garis yang menunjukkan daerah *maximum unsteadiness*.
- Daerah *bistable steady stall*. Aliran di dalam *diffuser* mengalami separasi yang dimulai pada salah satu *diverging wall* dan separasi dapat berpindah dari satu dinding ke dinding yang lain dengan terus berlangsung. Pada daerah ini dihasilkan *diffuser* dengan performa yang buruk.
- Daerah *jet flow*. Di daerah ini terjadi separasi yang sangat besar pada kedua *diverging wall* sehingga dihasilkan semacam *jet flow* di tengah *diffuser*. Performa yang dihasilkan *diffuser* ini sangat buruk.

### 2.1.3 Pressure Coefficient ( $C_p$ ) dan Pressure Recovery Coefficient ( $C_{pr}$ )

Koefisien tekanan ( $C_p$ ) adalah koefisien yang menyatakan distribusi tekanan pada kontur permukaan suatu *diffuser*. Koefisien tekanan diperoleh dari selisih antara tekanan statis lokal disatu titik dengan tekanan statis referensi pada *inlet diffuser* yang kemudian dibandingkan dengan tekanan dinamis yang juga diukur pada *inlet diffuser*.  $C_p$  didefinisikan sebagai :

$$C_p = \frac{p_{s,i} - p_{s,o}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}, \quad (2.1)$$

dimana:  $p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/L_I = i$   
 $p_{s,o}$  : tekanan statis referensi pada *diffuser inlet*  
 $\rho$  : massa jenis udara pada  $T = 27^\circ\text{C}$

$U_{ref}$  : *central velocity* fluida pada *inlet test section*

Persamaan 2.1 merupakan perumusan  $Cp_{aktual}$ . Sedangkan harga  $Cp_{ideal}$  ( $Cp_{inviscid}$ ) dapat diperoleh dengan cara mengaplikasikan persamaan *Bernoulli* dimana *section 1* adalah *inlet* sedangkan *section 2* adalah *outlet diffuser*, sehingga persamaan *Bernoulli* dapat dituliskan menjadi:

$$Cp_{inviscid} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2, \quad (2.2)$$

dimana:  $V_1$  : kecepatan pada *diffuser inlet*  
 $V_2$  : kecepatan pada *diffuser outlet*

Berdasarkan hubungan antara persamaan kontinuitas dan dengan persamaan *area ratio*,  $AR = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)$ , maka persamaan 2.2 dapat diubah menjadi:

$$Cp_{inviscid} = 1 - (AR)^{-2} \quad (2.3)$$

dimana:  $A_1$  : *area* pada *diffuser inlet*  
 $A_2$  : *area* pada *diffuser outlet*

*Pressure recovery coefficient* ( $Cp_r$ ) digunakan untuk menyatakan performa suatu *diffuser*. Besar selisih tekanan statis pada *diffuser outlet* dengan tekanan statis referensi *diffuser inlet* yang kemudian dibandingkan dengan tekanan dinamis yang diukur pada *diffuser inlet* merupakan nilai dari *pressure recovery coefficient*.

$$Cp_r = \frac{p_{s,e} - p_{s,o}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (2.4)$$

dimana:  $p_{s,e}$  : tekanan statis referensi pada  $x/L_1 = 0$   
 $p_{s,o}$  : tekanan statis *outlet* pada  $x/L_1 = 1$



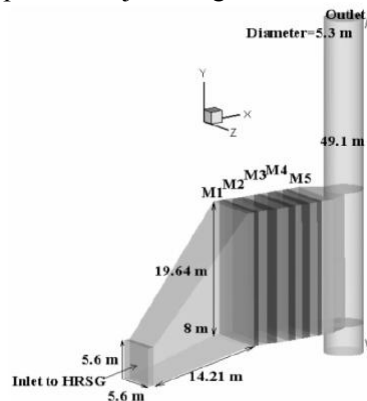
$\rho$  : massa jenis udara pada  $T = 27^\circ\text{C}$   
 $U_{ref}$  : kecepatan referensi pada *inlet test section*

Harga  $C_p$  maksimum pada *outlet diffuser* menyatakan seberapa besar kemampuan suatu *diffuser* dengan geometri tertentu dan kondisi operasi tertentu untuk meningkatkan tekanan dengan cara memperlambat kecepatan aliran fluida yang mengalir di dalamnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar  $C_p$  maka semakin baik performa dari *diffuser* tersebut.

## 2.2 Penelitian Terdahulu

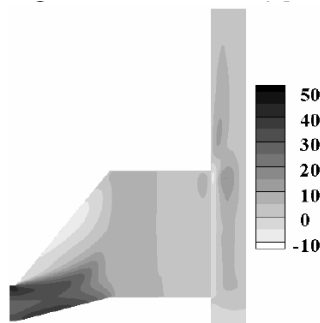
### 2.2.1 Param, et al (2011)

Param, et al (2011) melakukan sebuah penelitian tentang profil aliran di dalam HRSG saat keluar dari *inlet duct* dengan bentuk *diffuser* yang memiliki sudut bukaan atas dan bawah yang berbeda. Penelitian yang berjudul “*Hydrodynamic Analysis of Flue Gas Flow Behavior within a Heat Recovery Steam Generator*” bertujuan untuk mengamati efek dari bentuk *inlet duct* pada HRSG terhadap profil aliran dari *flue gas* setelah melewati *inlet duct* dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan *Turbulence Model Standard K- $\epsilon$* . Di dalam penelitian ini dilakukan 5 studi kasus untuk dimensi dasar dari *inlet duct* seperti ditunjukkan gambar 2.8



Gambar 2.8 Skema 3D HRSG *Inlet Duct* (Param, et al, 2011)

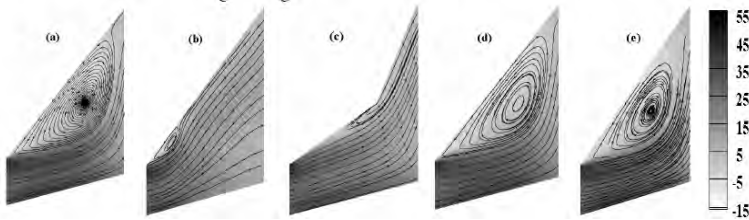
Untuk studi kasus 1 menggunakan dimensi *inlet duct* seperti gambar 2.8. Studi kasus 2 memiliki panjang *inlet duct* 14,21 m dan ditambahkan *flow corrective device* berupa *perforated plate* dengan *porosity* 0,5 di dalam *inlet duct*. Untuk studi kasus 3 memiliki panjang *inlet duct* 14 m dan terdapat dua kali *sudden expansion*. Studi kasus 4 dan 5 memiliki panjang *inlet duct* masing-masing 13 m dan 12 m. Pada semua kasus fluida yang mengalir melalui *inlet duct* adalah *flue gas* dari turbin gas dengan laju aliran massa 467.13 kg/s dan temperatur 542°C. Hasil simulasi aliran di dalam *inlet duct* untuk studi kasus 1 ditunjukkan pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Kecepatan Aliran Aksial untuk Studi Kasus 1  
*Inlet Duct* (Param, et al, 2011)

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.9 ekspansi dalam *inlet duct* HRSG menyebabkan terjadinya separasi. Fenomena ini membuat aliran terkonsentrasi ke arah tepi bawah saluran sehingga aliran memiliki kecepatan yang tinggi di bagian bawah *inlet duct* sementara di bagian atas aliran memiliki kecepatan yang rendah, hal ini menyebabkan distribusi kecepatan aliran yang tidak seragam pada awal *inlet duct*.

Hasil simulasi aliran di dalam *inlet duct* dari 5 studi kasus tersebut ditunjukkan pada gambar 2.10 sebagai berikut.



Gambar 2.10 Profil Aliran *Flue Gas* untuk Semua Kasus *Inlet Duct* (a) Dimensi *Inlet Duct* Seperti Gambar 2.8. (b) Panjang *Inlet Duct* 14,21m dan Ditambahkan *Perforated Plate Porosity* 0,5 (c) Panjang *Inlet Duct* 14m dan Dua Kali *Sudden Expansion* (d) Panjang *Inlet Duct* 13 m (e) Panjang *Inlet Duct* 12 m. (Param, et al, 2011)

Setelah didapat data dari *software* CFD, digunakan perhitungan RMS (root mean square) untuk mengevaluasi kesamaan (*uniformity*) dari kecepatan aliran *flue gas*. Semakin kecil nilai RMS menunjukkan aliran semakin *uniform*. Nilai RMS tiap-tiap kasus ditunjukkan pada tabel 2.1

Tabel 2.1: Nilai RMS untuk Semua Kasus

Kasus	RMS
1	28,52%
2	22,97%
3	26,71%
4	28,86%
5	29,48%

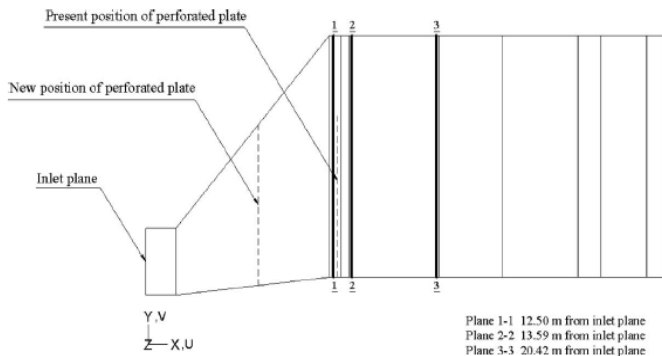
Semakin kecil nilai RMS menandakan semakin bagus aliran karena hal ini menunjukkan nilai *uniformity* dari aliran semakin baik. Untuk penelitian ini diketahui bahwa aliran paling baik terdapat pada kasus 2. Dari simulasi diketahui bahwa aliran ini paling *uniform* ditunjukkan dengan nilai RMS yang paling kecil.

Dari penelitian Param, et al (2011) dapat dijadikan referensi dalam penelitian ini mengenai bentuk *inlet duct* yang akan digunakan sebagai salah satu variasi *diffuser* yang akan disimulasikan yaitu *asymmetric diffuser*. Param, et al (2011) juga menampilkan kontur kecepatan aksial aliran pada bentuk *asymmetric inlet duct* atau *diffuser*. Selain itu sebagai referensi dalam pengukuran keseragaman aliran dengan menggunakan RMS.

### 2.2.2 Hegde, et al (2007)

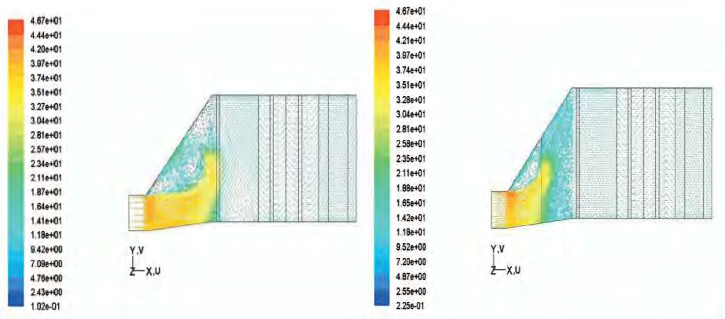
Penelitian ini dilakukan oleh Hegde, et al (2007) yang berjudul “*Flow and Heat Transfer in Heat Recovery Steam Generators*” menerangkan tentang pembentukan kontur aliran yang *uniform* dengan menggunakan *perforated plate* pada *inlet duct* atau *diffuser* dengan sudut bukaan atas dan bawah yang berbeda.

*Perforated plated* yang digunakan memiliki nilai *porosity* sebesar 0,5. Posisi *perforated plate* dari *inlet duct* yang dibandingkan ditunjukkan pada gambar 2.11. *Perforated plate 1* diletakkan pada jarak 12 m sementara *perforated plate 2* diletakkan pada jarak 6 m dari *inlet duct*.



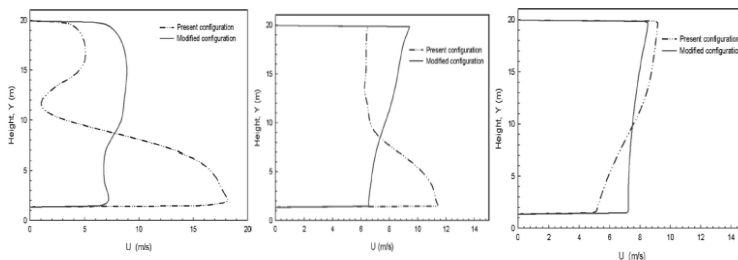
Gambar 2.11 Lokasi *Perforated Plate* dan Lokasi Pengukuran Kecepatan (Hegde, et al, 2007)

Pengukuran kontur kecepatan akan dilakukan pada *plane 1-1*, *plane 2-2*, dan *plane 3-3* seperti pada gambar 2.12 menunjukkan perbandingan aliran di dalam HRSG dimana lokasi dari *perforated plate* berbeda.



Gambar 2.12 Kontur Aliran di Dalam HRSG dengan Lokasi *Perforated Plate* Berbeda (Hegde, et al, 2007)

Hasil pengukuran numerik ditunjukkan pada gambar 2.13. Garis putus-putus menunjukkan aliran yang dihasilkan *inlet duct* dengan *perforated plate* berada di ujung *inlet duct*. Sedangkan garis *solid* menunjukkan aliran yang dihasilkan oleh *inlet duct* dengan *perforated plate* ditengah *inlet duct*. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi *perforated plate* berada di tengah-tengah *inlet duct* memberikan aliran yang lebih *uniform*.

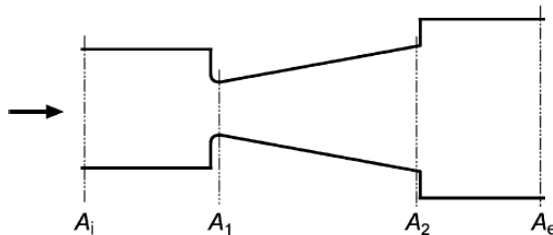


Gambar 2.13 Grafik Perbandingan *Velocity* dengan *Perforated Plate* di Ujung dan di Tengah *Inlet Duct* (Hegde, et al, 2007)

Dari penelitian Hegde, et al (2007) dengan bentuk *inlet duct* sudut bukaan atas dan bawah yang berbeda dapat dijadikan referensi salah satu variasi bentuk *diffuser* yaitu *asymmetric diffuser* dan kontur aliran yang melewati *inlet duct* atau *diffuser* tersebut. Selain itu juga dapat dijadikan referensi dalam mengukur keseragaman profil kecepatan aliran dengan menampilkan menjadi sebuah grafik hubungan kecepatan dengan posisi, dari grafik tersebut dapat dilihat profil aliran pada model mana yang memiliki kecepatan aliran yang seragam.

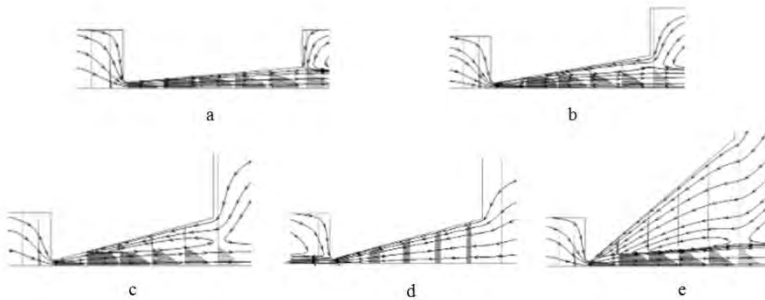
### 2.2.3 Wang, et al (2008)

Wang, et al (2008) melakukan penelitian mengenai *flat walled microdiffuser valve* dengan *aspect ratio* 0,92 dengan variasi sudut divergensi sebesar  $4^\circ - 120^\circ$  dan dengan bilangan *Reynolds* mulai dari 100 – 1000. *Flat walled microdiffuser* yang digunakan seperti gambar 2.14

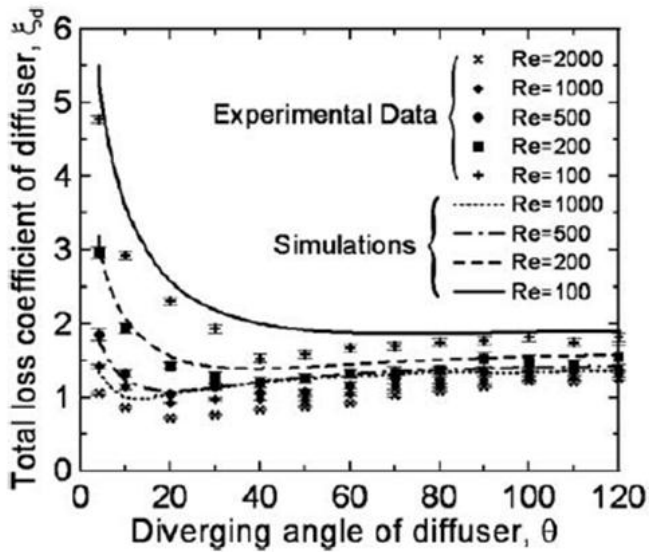


Gambar 2.14 Skema dari Aliran *Diffuser* (Wang, et al 2008)

Dari hasil simulasi didapat distribusi kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 dimana terlihat dengan bilangan *Reynolds* 500 sudut divergensi yang ditampilkan adalah  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ , dan  $80^\circ$ . Pada sudut yang kecil yaitu  $10^\circ$  tidak terjadi separasi di sepanjang *diffuser*. Namun ketika sudut divergensi naik menjadi  $20^\circ$  mulai terjadi separasi dan berlaku ketika sudut divergensi terus dinaikkan.



Gambar 2.15 Distribusi Kecepatan *Symmetric Diffuser* pada  $Re=500$  dengan (a)  $\theta=10^\circ$ , (b)  $\theta=20^\circ$ , (c)  $\theta=30^\circ$ , (d)  $\theta=50^\circ$  (e)  $\theta=80^\circ$  (Wang, 2007)



Gambar 2.16. Grafik Hubungan *Diverging Angle* terhadap *Total Loss Coefficient* (Wang, et al 2008)

Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan hasil eksperimen dapat dilihat pada gambar 2.16, hasil simulasi memiliki kesesuaian dengan hasil eksperimen ketika sudut *diverging* yang sangat besar dan sudut *diverging* kecil. Pengaruh sudut *diverging* terhadap total *loss coefficient* dapat dilihat bahwa total *loss coefficient* bernilai kecil ketika sudut *diverging* besar sebaliknya nilai total *loss coefficient* besar pada saat sudut *diverging* kecil. Pada Re 100 nilai total *loss coefficient* menunjukkan nilai yang paling tinggi baik dari hasil eksperimen maupun simulasi.



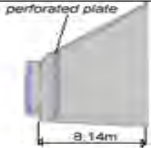
Dari penelitian Wang, et al (2008) dapat dijadikan referensi untuk variasi yang ketiga dan keempat yaitu *symmetric diffuser*, bagaimana pola aliran mengalir pada *symmetric diffuser* sudut *divergen* besar dengan adanya pengaruh *sudden enlargement* pada *outlet diffuser*, serta tinggi *inlet* dan *outlet* yang dijaga tetap.

#### **2.2.4 Wardhana (2014)**

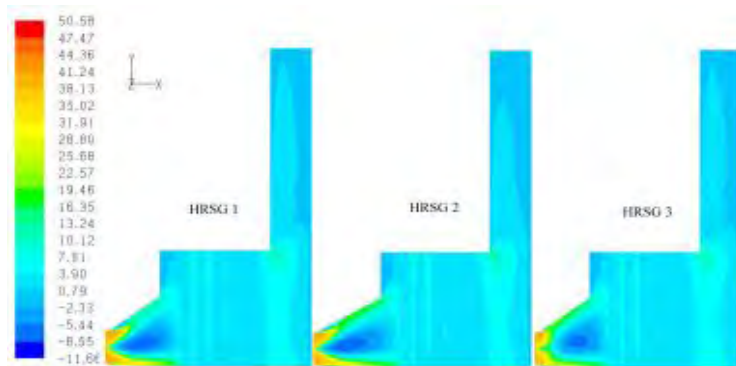
Wardhana (2014) melakukan penelitian yang berjudul Studi Numerik Variasi Inlet Duct Pada Heat Recovery Steam Generator. Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan *software fluent 6.3.26*. pemodelan yang dilakukan adalah tiga dimensi. Ada 3 macam *inlet duct* yang diteliti. *Inlet duct 1* dengan panjang 8,4m. *Inlet duct 2* memiliki panjang 10,811m. *Inlet duct 3* memiliki panjang 8,4m dan ditambahkan *flow correction device*



Tabel 2.2 Studi Kasus

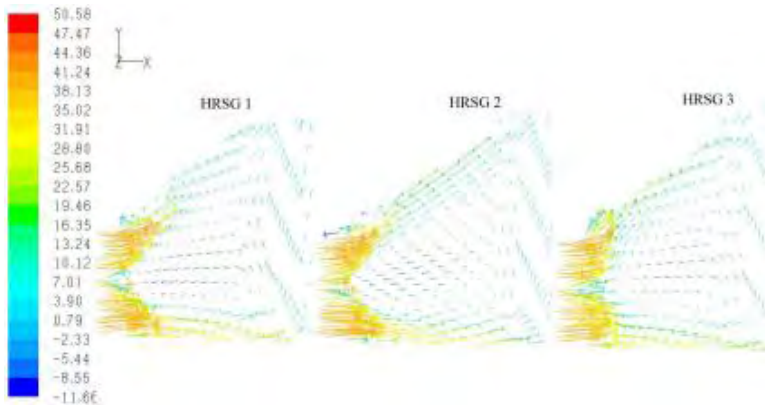
No	Nama	Studi Kasus	L/W	$2\theta$	Gambar
1	<i>Inlet duct 1</i>	<i>Inlet duct ini memiliki panjang total 8,14 m.</i>	1,21	$39^\circ$	
2	<i>Inlet duct 2</i>	<i>Inlet duct ini memiliki panjang total 10,811 m.</i>	1,56	$32^\circ$	
3	<i>Inlet duct 3</i>	<i>Inlet duct ini memiliki panjang total 8,14 m. Di dalamnya terdapat perforated plate dengan porosity 50% yang dimodelkan sebagai porous media.</i>	1,21	$39^\circ$	

Profil aliran *flue gas* saat memasuki HRSG memiliki profil seperti gambar 2.17 *Flue gas* memiliki *swirl angle*  $40^\circ$ .



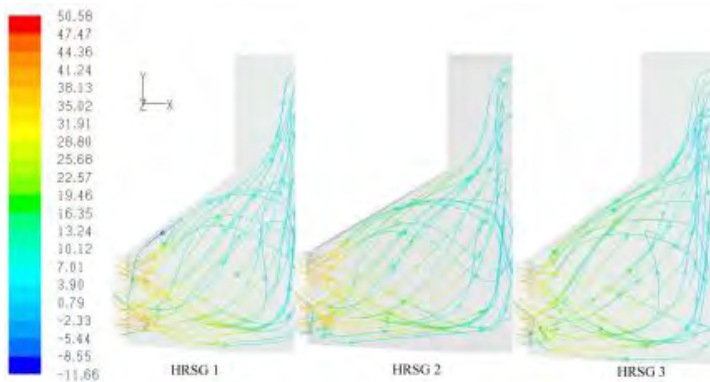
Gambar 2.17 Kontur Kecepatan x HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0 (Wardhana, 2014)

Gambar 2.17 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* melewati HRSG 1, 2 dan 3. Aliran di dalam *inlet duct* HRSG 1 dan 2 terdapat suatu *back flow* pada bagian tengah sehingga aliran *flue gas* terbagi menjadi dua bagian yaitu atas dan bawah. Oleh karena penampang yang dilewati kecil, menyebabkan kecepatan *flue gas* pada kedua bagian ini memiliki kecepatan yang tinggi. Aliran *flue gas* pada HRSG 3 yang menggunakan *flow correction device* dengan *porosity* 50% tampak tidak berbeda jauh bila dibandingkan dengan HRSG lainnya. Disini tetap terjadi suatu *blockage* oleh *back flow*. Akan tetapi *backflow* tersebut memiliki *inlet duct*.



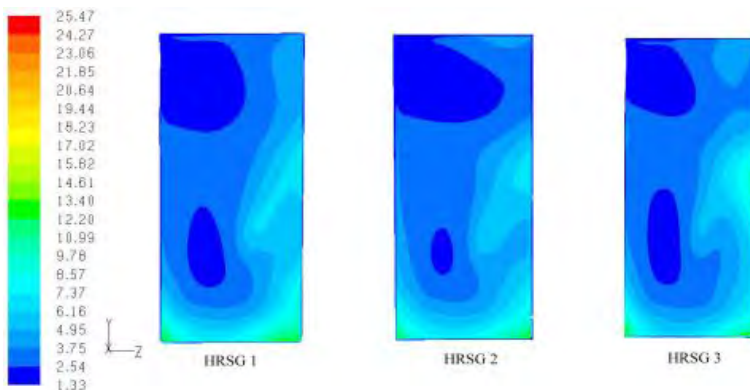
Gambar 2.18 Vektor Kecepatan HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0 (Wardhana, 2014)

Gambar 2.18 dari kiri ke kanan menunjukkan vektor kecepatan *flue gas* pada setiap HRSG. Adanya *back flow* yang menjadi *blockage* aliran *flue gas* menyebabkan penyebaran *flue gas* menjadi tidak merata dan membuat kecepatan saat keluar dari *inlet duct* menjadi berbeda-beda.



Gambar 2.19 *Pathlines* Kecepatan x HRSG 1, 2 dan 3 pada Bidang Z Koordinat 0 Bagian *Inlet Duct* (Wardhana, 2014)

Gambar 2.19 menunjukkan pola *pathlines* dari kecepatan x pada tiap HRSG. Disini terlihat bahwa aliran tampak tidak beraturan. Hal ini dikarenakan adanya *swirl angle* dari *flue gas* sehingga aliran memiliki pola tertentu. *Swirl angle* menyebabkan kecepatan dari *flue gas* semakin bervariasi saat keluar dari *inlet duct*



Gambar 2.20 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah X pada Penampang X Koordinat 18.6299 (Wardhana, 2014)

Gambar 2.20 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* sesaat sebelum melewati modul 1 pada HRSG 1, 2 dan 3. Ketiga aliran *flue gas* hampir memiliki pola yang serupa. Dimana kecepatan maksimum terjadi pada bagian bawah dari penampang. Pada ketiga bagian atas penampang memiliki kecepatan yang rendah. Kecepatan rendah yang paling luas dimiliki HRSG 1. Pada sisi kanan dari ketiga penampang cenderung memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada sisi kiri. Penambahan panjang *inlet duct* pada HRSG 2 memberikan efek semakin kecilnya luasan *flue gas* berkecepatan rendah pada bagian tengah penampang pengamatan. Penambahan *flow correction device* pada HRSG 3 menghasilkan kontur *flue gas* yang tidak terlalu berbeda dengan HRSG 1. Dimana pada HRSG 3 luasan *flue gas* berkecepatan rendah hampir sama luas dengan HRSG 1.

Untuk mengukur tingkat keseragaman (*uniform*) dari *flue gas* digunakan metode RMS. Dimana RMS ini menunjukkan standar deviasi dari kecepatan *flue gas*. Semakin kecil nilai RMS, menunjukkan keseragaman yang semakin bagus karena penyebaran kecepatan semakin mengecil.

Tabel 2.3 Data Kuantitatif Kecepatan *Flue Gas* pada Bidang X Koordinat 18.6299

HRSG	RMS
1	55,61 %
2	52,44 %
3	52,17 %

Dari penelitian Wardhana (2014) yang melakukan simulasi *inlet duct* dengan bentuk *asymmetric diffuser* yang dapat dijadikan referensi salah satu variasi bentuk *diffuser* yang akan

dilakukan dalam penelitian ini, dan dimensi HRSG digunakan sebagai acuan dimensi pada penelitian ini pula. Wardhana (2014) juga melakukan simulasi *inlet duct* pada kondisi operasi aliran fluida memasuki *inlet duct* HRSG yaitu pada temperatur 880,2 K dan bilangan *Reynolds*  $3,2 \times 10^6$  dengan menggunakan model turbulensi *realizable k-epsilon* yang akan digunakan juga dalam penelitian ini.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Tahap-tahap Penelitian

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode penelitian yang akan digunakan, yaitu dengan metode penelitian numerik. Metode penelitian numerik ini menggunakan *software* STAR-CCM+ untuk menganalisa kontur aliran melewati *diffuser* seperti kontur kecepatan, kontur tekanan, *streamline*, *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ), *root mean square* (RMS), dan distribusi *pressure loss coefficient* (K) dengan variasi empat bentuk *diffuser* dengan panjang *diffuser* yang sama dengan metodologi sebagai berikut:

1. Studi Kasus

Permasalahan yang terjadi dapat diketahui melalui data-data yang ada. Tujuan utama dari studi kasus adalah untuk mengetahui permasalahan yang terjadi.

2. Studi Literatur

Studi literatur yaitu mencari literatur yang berkaitan dengan topik penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan informasi baik mencari jurnal, *e-book*, dan hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yaitu mengumpulkan data-data yang diperlukan baik data primer maupun data sekunder. Data ini berupa dimensi *inlet duct* HRSG dan data operasi HRSG yang didapat dari penelitian Wardhana (2014).

4. Melakukan Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* STAR-CCM+. pada penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kontur aliran melewati *diffuser*. Pada tahap ini dibagi menjadi tiga tahap yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

### 5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Laporan tugas akhir ini berisi pendahuluan, tinjauan pustaka, metode penelitian, analisa dan pembahasan serta kesimpulan dan saran dalam pelaksanaan simulasi yang telah dilakukan.

### 3.2 Parameter yang Dianalisa

Pengukuran profil aliran bertujuan untuk mengetahui tingkat *uniform* dari masing-masing aliran pada empat model, pengukuran dilakukan pada aliran sesaat sebelum memasuki *porous medium*. Untuk mengukurnya digunakan perhitungan RMS (*root mean square*) yaitu :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \xi_i^2}{n}} * 100\% \quad (3.1)$$

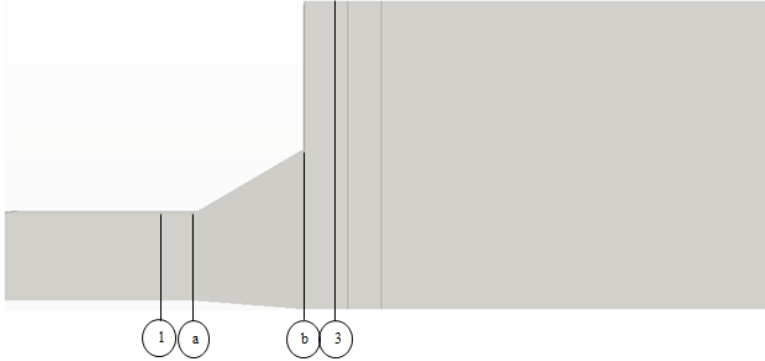
$$\xi_i = \frac{u_i - u_{av}}{u_{av}} \quad (3.2)$$

Dimana:

$u_i$	= Kecepatan Lokal
$u_{av}$	= Kecepatan Rata-rata
$n$	= Jumlah Grid
$\xi_i$	= Fluktuasi Kecepatan

Nilai RMS ini menunjukkan kualitas *uniform* dari aliran. Semakin kecil nilai RMS menunjukkan semakin *uniform* aliran tersebut, karena menunjukkan variasi dari aliran semakin kecil (Param, 2011)

Pengukuran *pressure loss coefficient* dilakukan untuk mengetahui distribusi tekanan yang paling optimum dari model *diffuser* yang akan disimulasikan, distribusi tekanan yang paling optimum dapat ditentukan dari pengukuran *pressure loss coefficient* (K) atau koefisien kehilangan tekanan, model yang paling optimum jika memiliki nilai K yang paling minimum. Nilai K dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Titik Pengambilan Data *Pressure Loss Coefficient* (K)

$$K_{1-3} = \frac{\Delta P_{1-3}}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}_1^2} \quad (3.3)$$

$$\Delta P = \Delta P_{1-a} + \Delta P_{a-b} + \Delta P_{b-3} \quad (3.4)$$

$$\Delta P = P_1 - P_3 + \frac{1}{2}\alpha_1\rho\bar{V}_1^2 - \frac{1}{2}\alpha_3\rho\bar{V}_3^2 \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\bar{V}^3_A} \int_A u^3 dA \quad (3.6)$$

Maka persamaan *pressure loss coefficient* :

$$K_{1-3} = \frac{\Delta P_{1-3}}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}_1^2} + \left[ \alpha_1 - \left( \alpha_3 \left( \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_3} \right)^2 \right) \right] \quad (3.7)$$

Dimana :  $P_1$  = Tekanan *inlet diffuser*

$P_3$  = Tekanan sebelum *porous medium*

$\alpha$  = *Kinetic energy correction factor*

$\bar{V}_1$  = *Volume average velocity* pada *inlet diffuser*

$\bar{V}_3$  = *Volume average velocity* sebelum *porous medium*

$u$  = Kecepatan aksial

$\rho$  = Densitas



### 3.3 Metode Numerik

Penelitian numerik dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan *software* STAR CCM+. Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik adalah tahap *pre-processing*, tahap *processing*, dan tahap *post-processing* ketiga tahap tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* STAR CCM+.

#### 3.3.1 Tahap *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* merupakan tahap awal untuk menganalisa pemodelan *computational fluid dynamics*. Dalam tahap ini terdiri dari pembuatan geometri, *meshing*, dan penentuan domain.

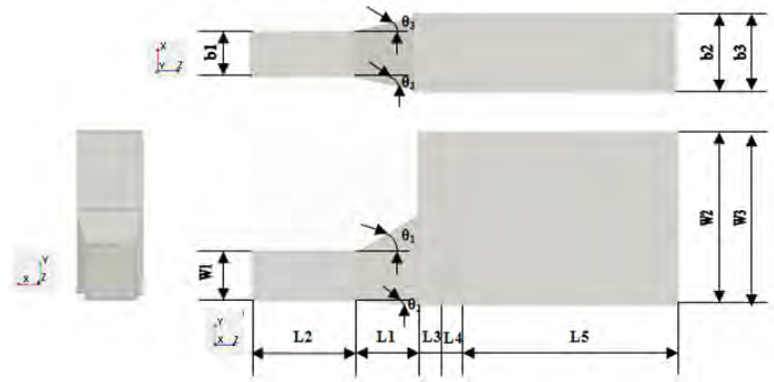
##### 3.3.1.1 Geometri dan Pemodelan *Diffuser*

Terdapat empat geometri *diffuser* pada penelitian ini dengan panjang *diffuser* yang sama 8400 mm. Ketiga *diffuser* tersebut memiliki geometri seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2 untuk *asymmetric diffuser* dengan satu *sudden enlargement* ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ ), gambar 3.3 *asymmetric diffuser* ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ), gambar 3.4 *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* ( $2\theta=33,4^\circ$ ) dan gambar 3.5 *symmetric diffuser* ( $2\theta=88,08^\circ$ ). Spesifikasi dari *test section* penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut :

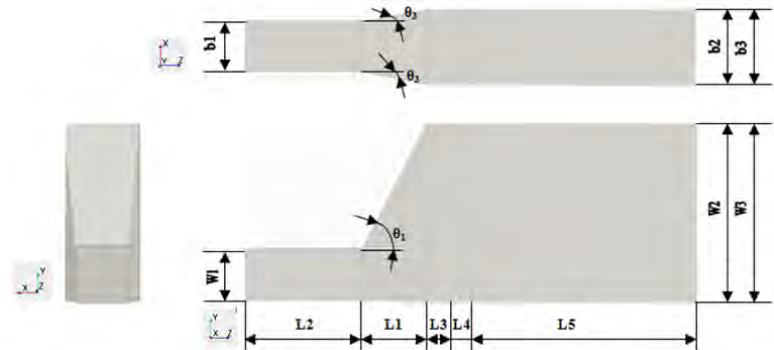
Keterangan :

- Model : 1. *Asymmetric diffuser* dengan satu *sudden enlargement* ( $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=3,4^\circ$ )
- : 2. *Asymmetric diffuser* ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ )
- : 3. *Symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* ( $2\theta=33,4^\circ$ )
- : 4. *Symmetric diffuser* ( $2\theta=88,08^\circ$ )

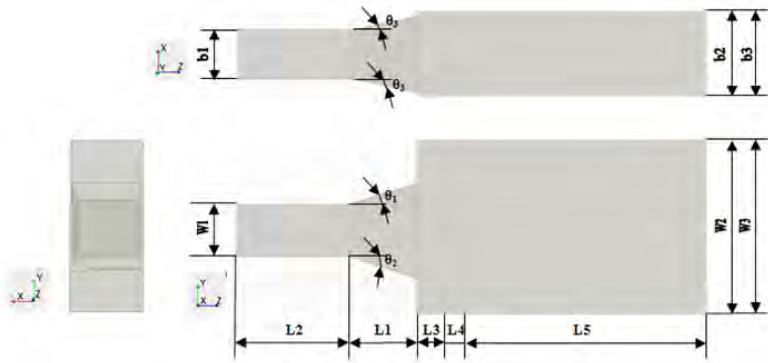
- $\theta_3$  = 10,78°
- Panjang *diffuser* (L1) = 8400 mm
- Panjang *upstream channel* (L2) = 15000 mm
- Panjang *downstream channel*  
sebelum *porous medium* (L3) = 3229 mm
- Panjang *porous medium* (L4) = 2438 mm
- Panjang *downstream channel*  
setelah *porous medium* (L5) = 28525 mm
- Lebar *span inlet* (b1) = 6500 mm
- Lebar *span outlet* (b2) = 9700 mm
- Lebar *porous medium* (b3) = 9700 mm
- Tinggi *inlet* (W1) = 6500 mm
- Tinggi *outlet* (W2) = 22750 mm
- Tinggi *porous medium* (W3) = 22750 mm



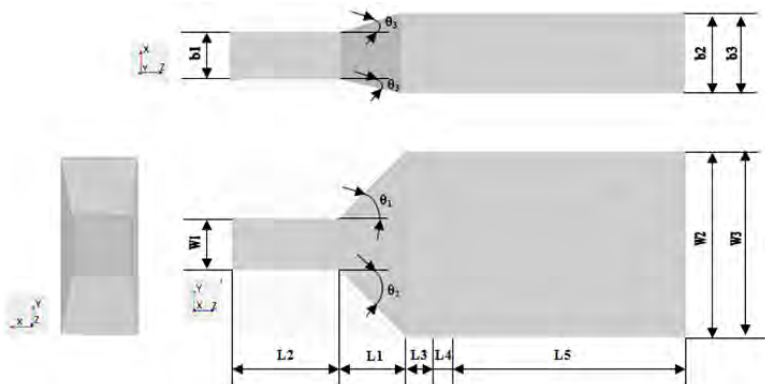
Gambar 3.2 Dimensi Model 1



Gambar 3.3 Dimensi Model 2



Gambar 3.4 Dimensi Model 3



Gambar 3.5 Dimensi Model 4

Dalam penelitian ini akan dilakukan uji secara numerik pada *diffuser*. Dengan memvariasikan bentuk dari *diffuser* menggunakan 3 bilangan *Reynolds* yaitu  $velocity_1$  6,726 m/s dengan  $Re_1 = 8 \times 10^5$ ,  $velocity_2$  13,45 m/s dengan  $Re_2 = 1,6 \times 10^6$ ,  $velocity_3$  26,9 m/s dengan  $Re_3 = 3,2 \times 10^6$ , densitas ( $\rho$ ) = 0,699 kg/m<sup>3</sup> dan viskositas dinamik ( $\mu$ ) =  $3,82 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup> diketahui

model mana yang menghasilkan kontur aliran yang paling seragam atau *uniform*.

### 3.3.1.2 Meshing

Pembuatan *mesh* elemen hingga (*meshing*) adalah pembagian model menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Gambar 3.6 menunjukkan *meshing* yang digunakan.



Gambar 3.6 Bentuk *Meshing* 3D Hexahedral Map Model 2

### 3.3.2 Tahap Processing

Processing merupakan langkah kedua dalam melakukan simulasi numerik dengan *computational fluid dynamics*. Dalam proses ini pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* STAR-CCM+. Terdiri dari beberapa tahap yaitu *models, operating condition, boundary condition, solution, initialize*, dan *monitor residual*.

#### 3.3.2.1 Pemilihan *Turbulence Modell*

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Param (2011) menggunakan model K- $\epsilon$  dan Wardhana (2014) menggunakan model *realizable* K- $\epsilon$ , karena model *realizable* K- $\epsilon$  lebih unggul dalam konstrain matematisnya. Model ini digunakan untuk aliran yang melibatkan putaran, *boundary layer* yang mempunyai *adverse pressure gradient*, separasi dan resirkulasi

dengan digunakan *standar wall function* dengan ketentuan *mesh*  $30 < y^+ < 300$ .

### 3.3.2.2 *Operating Condition*

Pada penelitian ini, *operation conditions* diatur berdasarkan kondisi *inlet* dengan pada titik tengah koordinat *inlet*. *Operating conditions* yang digunakan adalah tekanan *operating pressure* 104324 Pa pada *diffuser*.

### 3.3.2.3 *Boundary Condition*

*Boundary condition* merupakan kondisi-kondisi yang didapat dari data aktual dan dimasukkan pada *inlet*, mulai dari kecepatan dan tekanan. Sedangkan pada *outlet* biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD merupakan nilai yang didapat dari semua variabel yang didefinisikan dan diekstrapolasi dari titik (nodal) atau sel sebelumnya.

*Boundary Condition* yang diatur adalah *inlet*, *outlet*, *wall*, *interface*, dan *porous medium*. Pada *inlet* digunakan *velocity inlet* dalam m/s, pada *outlet* digunakan *flow split outlet*, pada *wall* digunakan *boundary condition wall*, pada *interface* digunakan *overset mesh*, dan pada *porous medium* digunakan *porous region*.

#### a. *Inlet*

*Inlet* disini berupa kondisi awal mula dari fluida saat memasuki *diffuser*. Yaitu berupa kecepatan dan temperatur awal dari fluida. Aliran dari fluida berkecepatan 6,726 m/s, 13,45 m/s dan 26,9 m/s serta temperatur awal sebesar 880,2 K.

Material fluida diasumsikan sebagai *flue gas* dengan *properties* sebagai berikut:

$$\text{Viskositas} = 3,82 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$\text{Densitas} = 0,699 \text{ kg/m}^3$$

#### b. *Outlet*

*Outlet* dari *boundary condition* ini digunakan *flow split outlet*

c. **Wall**

Pemodelan dari *wall* dikondisikan sebagai *no slip wall* dan *stationary wall*. *No slip wall* menandakan terdapat interaksi antara fluida dengan *wall*. Sementara *stationary wall* menandakan bahwa *wall* dalam keadaan diam.

d. **Overset Mesh**

Pemodelan dari *interface* digunakan *overset mesh*

e. **Porous Region**

Pada penelitian ini *porous medium* berupa kumpulan *tube* disimulasikan sebagai sebuah volume yang berlubang, *porous medium* diletakkan pada jarak 3229 mm setelah *outlet diffuser* dengan tebal 2438 mm. Pengaturan *porous medium* pada Star-CCM+ dapat dilakukan dengan mengatur *region* sebagai *porous region*. Data masukan yang diperlukan untuk mendefinisikan *porous medium* antara lain *porosity* dan *porous inertial resistance*. Nilai *porous inertial resistance* dapat diperoleh dengan rumusan sebagai berikut :

$$\Delta P = C_2 \frac{1}{2} \rho V^2 L \quad (3.8)$$

$$C_2 = \frac{2\Delta P}{\rho V^2 L} \quad (3.9)$$

Dimana :  $\Delta P$  = *Pressure drop*

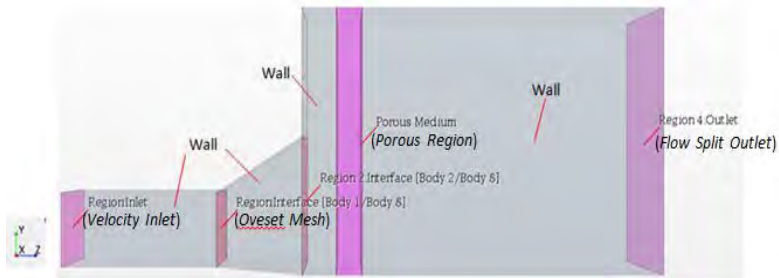
$C_2$  = *Inertial resistance*

$\rho$  = *Densitas*

$V$  = *Kecepatan sebelum porous medium*

$L$  = *Lebar dari porous medium*

*Boundary Condition* untuk model 1 ditampilkan pada gambar 3.7, *boundary condition* untuk model lainnya yaitu model 2, 3, dan 4 juga sama dengan pada model 1



Gambar 3.7 *Boundary Condition* Model 1

#### 3.3.2.4 *Solution*

*Solution* pada penelitian ini akan menggunakan *second order* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.

#### 3.3.2.5 *Initialize*

*Initialize* merupakan data masukan awal sebagai acuan Star CCM+ untuk melakukan kalkulasi berdasarkan *boundary condition* yang ada.

#### 3.3.2.6 *Monitor Residual*

*Monitor Residual* adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergensi yang diinginkan. Harga konvergensi ditetapkan sebesar  $10^{-4}$ , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-4}$  dan garis telah asimtot terhadap horizontal

#### 3.3.2.7 *Iterate*

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada STAR CCM+. Pada



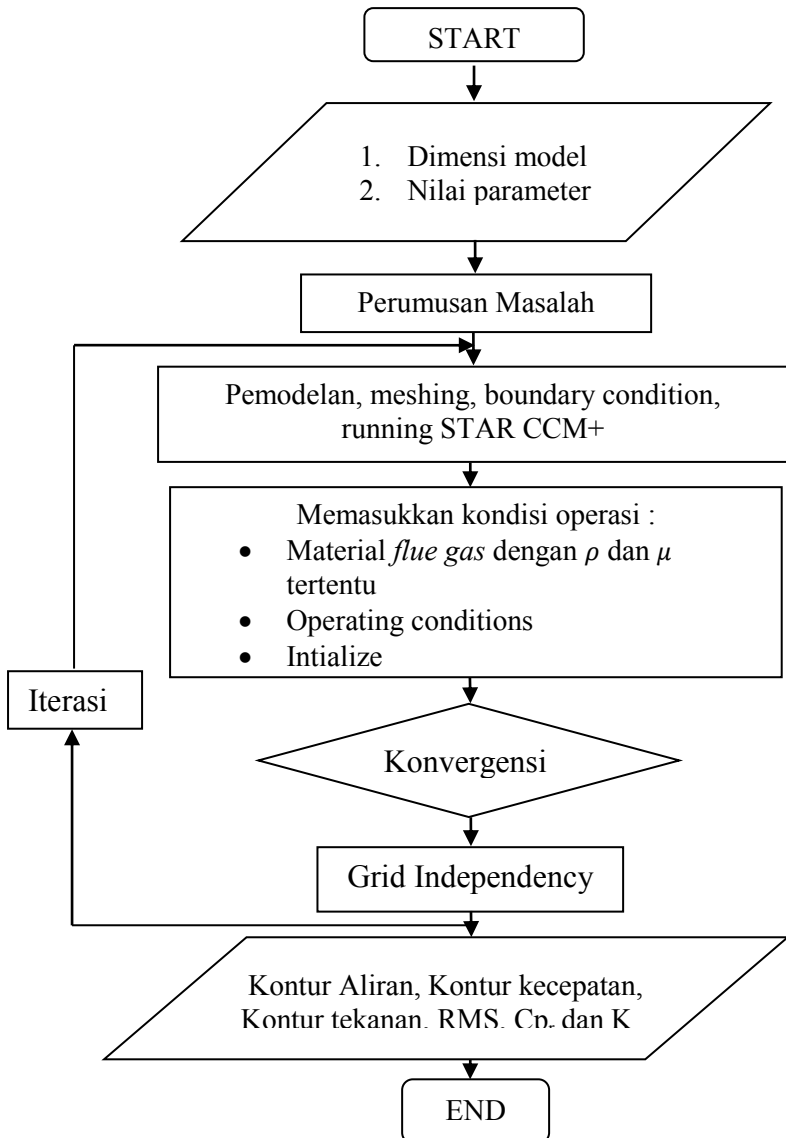
tahap ini dilakukan iterasi sampai *convergence criterion* sebesar  $10^{-4}$ .

### **3.3.3 Tahap *Post-Processing***

Setelah diperoleh solusi numerik dari tahap *processing/solving*, tahap berikutnya adalah memvisualisasikan dan menganalisa hasil dari solusi numerik tersebut. STAR CCM+ akan digunakan dalam tahap ini. Pada tahapan ini akan diperoleh informasi mengenai *flow field* pada saat kondisi operasi *diffuser*. Data yang diambil berupa kontur aliran meliputi kontur kecepatan, kontur tekanan, *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ), *root mean square* (RMS), dan *pressure loss coefficient* (K).

### **3.3.4 *Flowchart* Penelitian**

Secara singkat prosedur penelitian numerik ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.8

Gambar 3.8 *Flowchart* Penelitian

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Analisa yang dilakukan dalam simulasi tugas akhir ini meliputi kontur kecepatan pada HRSG secara keseluruhan, distribusi kecepatan sesaat sebelum masuk *porous medium*, *streamline flue gas* pada *diffuser* dan sesaat sebelum masuk *porous medium*, distribusi tekanan pada HRSG secara keseluruhan dan distribusi tekanan sesaat sebelum masuk *porous medium*. Data yang dianalisa merupakan hasil dari pemodelan numerik menggunakan *software* STAR-CCM+. Hasil *post-processing* dari pemodelan meliputi kontur kecepatan, kontur tekanan, *streamline*, *pressure recovery coefficient* ( $C_{p,r}$ ), *root mean square* (RMS), dan distribusi *pressure loss coefficient* (K) pada keempat model yang diaplikasikan pada *inlet duct* HRSG.

### 4.1 Spesifikasi *Porous Medium* pada HRSG

Pada analisa numerik untuk keempat model bentuk *diffuser* yang diaplikasikan pada *inlet duct* HRSG ini terdapat satu modul yaitu berupa *porous medium* yang memiliki spesifikasi dan dimensi sebagai berikut yang ditampilkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi dari *Porous Medium* yang Dilalui *Flue Gas* Berupa Modul

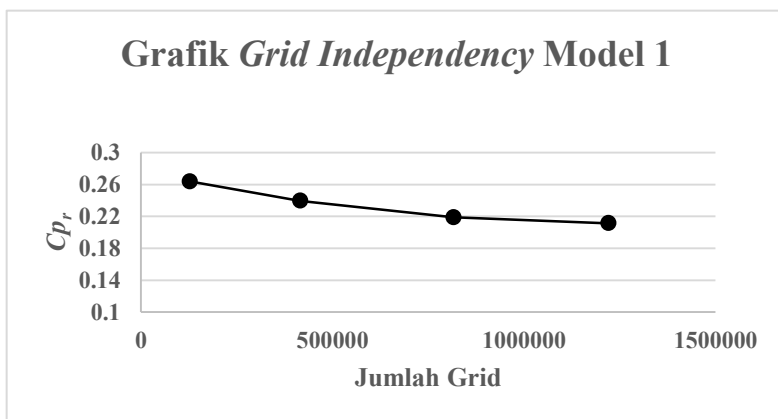
No.	Data	Nilai	Satuan
1	Panjang	9.700	m
2	Lebar	2.438	m
3	Tinggi	22.750	m
4	<i>Porosity</i>	0.8621	
5	<i>Inertial Resistance</i>	18,25	$\frac{kg}{m^4}$

#### 4.2 Grid Independency

*Grid independency* perlu dilakukan sebelum pengambilan data numerik, hal ini bertujuan untuk memeriksa apakah jumlah *grid* atau *cell* yang digunakan sudah tepat untuk pengambilan data, agar data yang didapat sesuai. *Grid independency test* ini juga bertujuan untuk menemukan *mesh* yang terbaik dan efisien untuk dilakukan pengamatan numerik. Berikut data proses *grid independency* untuk keempat model bentuk *diffuser* yang disajikan pada tabel 4.2 sampai tabel 4.5

Tabel 4.2 *Grid Independency* untuk Model 1

<i>Mesh</i>	<b>Grid</b>	$C_{p_r}$
1	127500	0.2638
2	416000	0.2395
3	816000	0.2188
4	1220675	0.2114



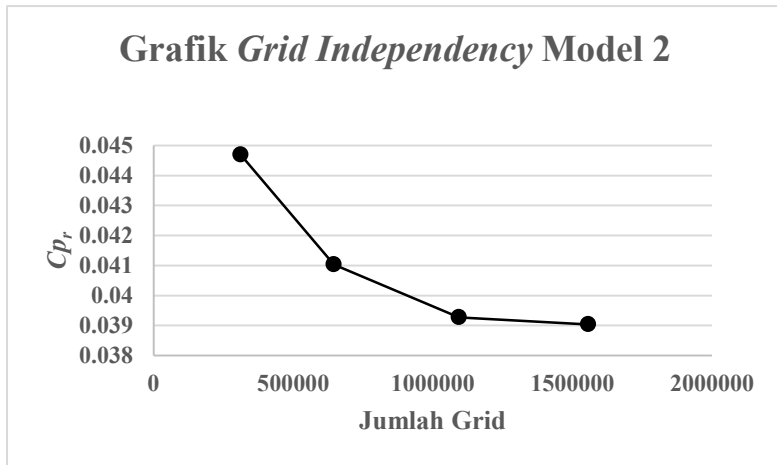
Gambar 4.1 Grafik *Grid Independency* Model 1

Dari hasil *grid independency* di atas untuk model 1 antara jumlah grid 816000 dan 1220675 terdapat selisih nilai  $C_{p_r}$  yang

sangat kecil, hal ini juga ditunjukkan pada gambar 4.1 *trendline* grid 816000 dan 1220675 tidak menunjukkan perbedaan dan hampir mendekati garis lurus. Maka pada penelitian ini untuk model 1 menggunakan grid 816000.

Tabel 4.3 *Grid Independency* untuk Model 2

<i>Mesh</i>	<b>Grid</b>	$C_{p_r}$
1	311325	0.0447
2	645732	0.041
3	1093970	0.0393
4	1556500	0.039

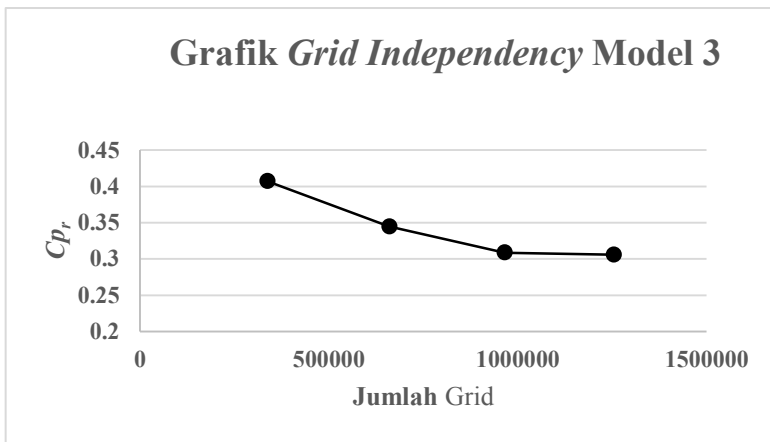


Gambar 4.2 Grafik *Grid Independency* Model 2

Dari tabel 4.3 *grid independency* model 2 antara jumlah grid 1093970 dan 1556500 terdapat selisih nilai  $C_{p_r}$  yang kecil, hal ini didukung dengan gambar 4.2 yang menunjukkan *trendline* yang datar dari grid 1093970 ke grid 1556500. Maka untuk model 2 menggunakan grid sebanyak 1093970.

Tabel 4.4 *Grid Independency* untuk Model 3

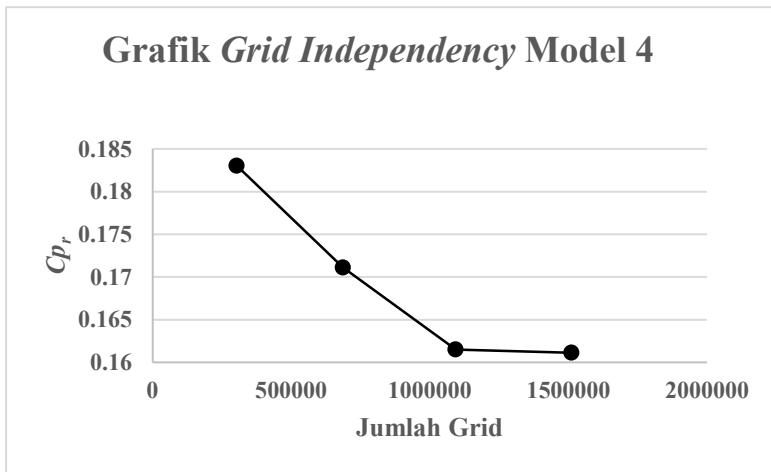
<i>Mesh</i>	<b>Grid</b>	$C_{p_r}$
1	337800	0.4069
2	660645	0.3447
3	966000	0.3086
4	1255356	0.3058

Gambar 4.3 Grafik *Grid Independency* Model 3

Dari tabel 4.4 grid model 3 antara jumlah grid 966000 dan 1255356 terdapat selisih nilai  $C_{p_r}$  yang kecil, hal ini didukung dengan gambar 4.3 yang menunjukkan tidak terjadi penurunan *trendline* antara grid 966000 dan grid 1255356. Maka untuk model 3 menggunakan grid 966000.

Tabel 4.5 *Grid Independency* untuk Model 4

<i>Mesh</i>	<b>Grid</b>	$C_{p_r}$
1	303125	0.1830
2	687540	0.1711
3	1093974	0.1615
4	1511262	0.1611

Gambar 4.4 Grafik *Grid Independency* Model 4

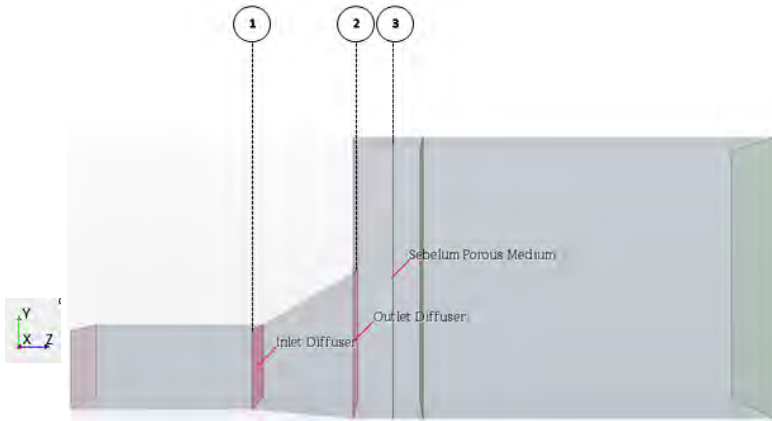
Dari hasil *grid independency* tabel 4.5 untuk model 4 antara jumlah grid 1093974 dan 1511262 terdapat selisih nilai  $C_{p_r}$  yang sangat kecil, pada gambar 4.4 juga terlihat penurunan *trendline* pada grid 1093974 ke grid 1511262 tidak mencolok. Maka untuk model 4 menggunakan grid sebanyak 1093974.

### 4.3 Titik Pengambilan Data

Pada simulasi numerik ini dilakukan beberapa data pada titik-titik pengamatan tertentu yang ditunjukkan pada gambar 4.5 untuk model 1. Titik-titik pengamatan yang diambil diantaranya data nomor 1 diambil pada *inlet diffuser*, data nomor 2 diambil



pada *outlet diffuser* dan data nomor 3 diambil pada jarak 200 mm sebelum memasuki *porous medium*.



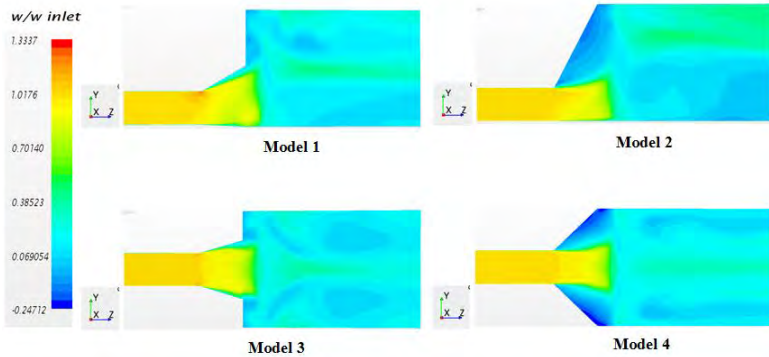
Gambar 4.5 Titik Pengambilan Data Model 1

Titik pengambilan data untuk model 2, 3 dan 4 diambil pada titik dan posisi yang sama seperti pada model 1. Dimana titik 1 yaitu *inlet diffuser*, titik 2 yaitu *outlet diffuser* dan titik 3 adalah 200 mm sebelum memasuki *porous medium*. Untuk perhitungan  $C_{p_r}$  data diambil dari titik 1 dan titik 2, sedangkan untuk perhitungan *pressure loss coefficient* (K) diambil dari titik 1 dan titik 3.

#### 4.4 Analisa Kualitatif

##### 4.4.1 Analisa Kontur Kecepatan ke Arah Z Bidang X

Distribusi kecepatan yang merupakan hasil simulasi dari empat model *diffuser* pada ketiga yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  divisualisasikan berupa kontur yang diambil pada bidang *midspan*. Kontur kecepatan untuk masing-masing  $Re$  ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.6 sampai 4.8.



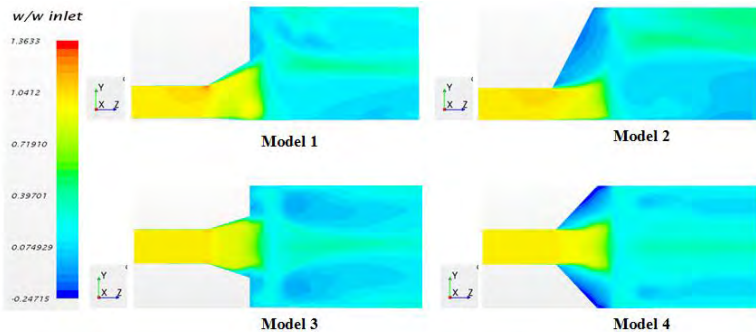
Gambar 4.6 Kontur Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midspan* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

Dari kontur kecepatan di atas terlihat kecepatan paling tinggi untuk keempat model berada pada bagian *inlet*, dari kontur kecepatan diatas dapat dilihat bahwa separasi terbesar terjadi pada model 2 ditunjukkan luasan daerah terjadinya separasi lebih besar dibandingkan ketiga model lainnya. Daerah separasi yang besar berikutnya terjadi pada model 4, pada *symmetric diffuser* terjadi separasi di dua bagian yaitu dinding atas dan dinding bawah, hal ini sesuai dengan peta kestabilan dimana model 4 berada pada daerah *jet flow* yaitu terjadi separasi yang sangat besar pada kedua *diverging wall* sehingga dihasilkan semacam *jet flow* di tengah *diffuser*.

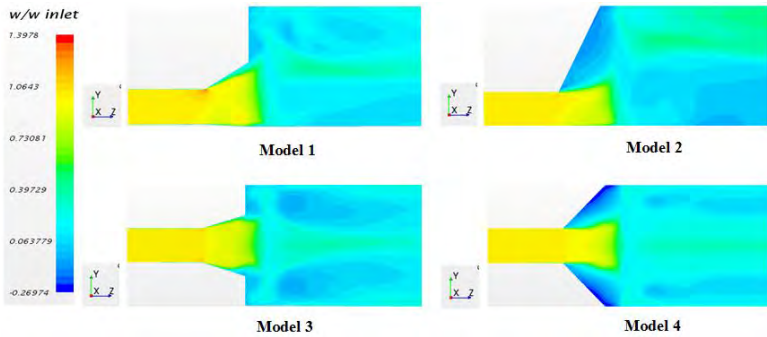
Pada model 2 *asymmetric diffuser* ( $\theta_1 = 62,66^\circ$ ,  $\theta_2 = 0^\circ$ ) terlihat luasan separasi lebih besar dibandingkan pada model 1 *asymmetric diffuser* ( $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = 3,4^\circ$ ), hal ini disebabkan pada model 2 terdapat pengaruh tekanan yang semakin besar dikarenakan sudut bukaan *diffuser* pada model 2 jauh lebih besar dibandingkan pada model 1. Sehingga aliran yang mengalir didalamnya akan memperoleh pengaruh *adverse pressure gradient* (APG) yang semakin besar, dengan pengaruh APG dan juga *friction* maka aliran akan mengalami defisit momentum pada dinding *diffuser*. Adanya defisit momentum pada aliran didekat dinding dapat menyebabkan gradien kecepatan bernilai nol,

sehingga aliran tidak mampu lagi mengikuti kontur dari *diffuser* yang menyebabkan terjadinya separasi semakin besar (*massive*), kondisi separasi tersebut ditandai dengan adanya *back flow*. Begitu pula yang terjadi pada model 4 yaitu *symmetric diffuser* ( $2\theta = 88,08^\circ$ ) dengan sudut *diverging* yang lebih besar maka luasan terjadinya separasi pada model 4 lebih besar dibandingkan pada model 3.

Model 1 dan model 3 pada kontur kecepatan tidak terlihat dengan jelas awal terjadi separasi pada dinding *diffuser* karena pada data tersebut tidak memuat mengenai arah dari aliran fluida, namun terlihat adanya *vortex* pada daerah *sudden enlargement*. Pada model 1 dengan bentuk *asymmetric diffuser* dan satu *sudden enlargement* maka *vortex* terjadi pada dinding atas saja, model 3 *symmetric diffuser* dan dua *sudden enlargement* terlihat *vortex* terjadi pada dua daerah yaitu dinding atas dan dinding bawah.



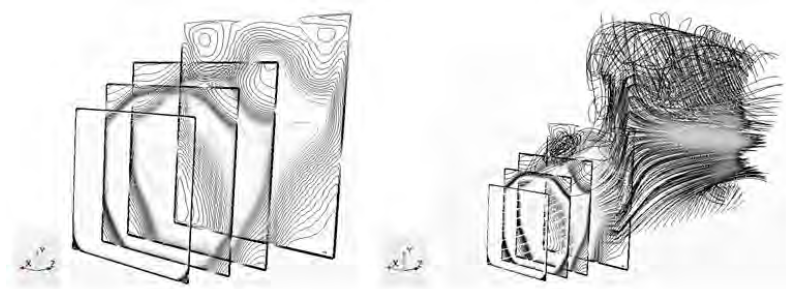
Gambar 4.7 Kontur Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midspan* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$



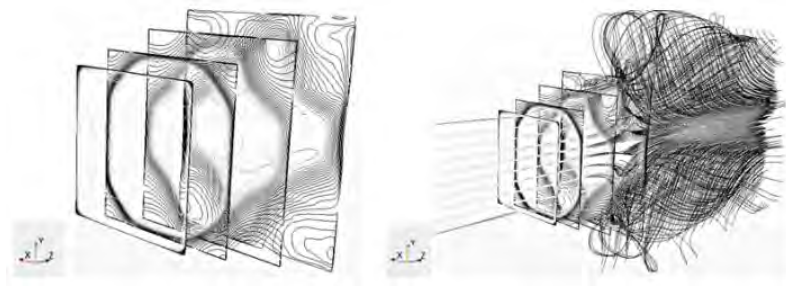
Gambar 4.8 Kontur Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midspan* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Distribusi kecepatan ke arah Z pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  yang ditunjukkan pada gambar di atas terlihat dari hasil simulasi  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  menunjukkan hasil yang hampir sama. Namun terdapat beberapa perbedaan antara  $Re\ 8 \times 10^5$  dengan  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  terlihat bahwa kontur kecepatan model 1, 2, 3 dan 4 pada bagian *inlet*, *diffuser*, *sudden enlargement* dan setelah *porous medium* lebih seragam dibandingkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$ . Pada model 3 dan 4 terlihat pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  terlihat luasan berkecepatan rendah setelah melewati *porous medium* lebih kecil dibandingkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$ .

Kontur kecepatan ke arah Z pada model 1 dan model 3 terlihat tidak ada separasi yang terjadi, namun setelah ditampilkan kontur kecepatan ke arah Z dengan tipe *line* serta ditambahkan tampilan *streamlinenya* maka terlihat jelas seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9 dan 4.10 di bawah berikut



Gambar 4.9 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe *Line* dan *Streamline* pada Model 1

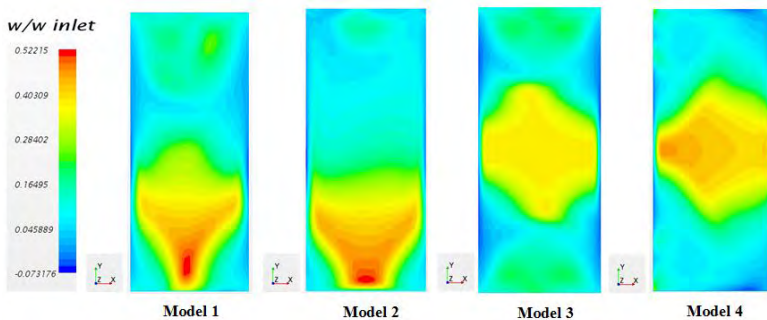


Gambar 4.10 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe *Line* dan *Streamline* pada Model 3

Pada model 1 dan 3 terjadi separasi pada dinding *diffuser*, untuk model 1 terjadi separasi pada dinding atas *diffuser* dengan luasan yang kecil dan pada model 3 juga terjadi separasi yaitu pada dinding atas dan bawah *diffuser* dengan luasan yang sangat kecil.

#### 4.4.2 Analisa Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z

Kontur komponen kecepatan *flue gas* sesaat sebelum melewati *porous medium* pada model 1, 2, 3 dan 4 divisualisasikan, untuk ketiga Re yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  yang diambil pada bidang Z dengan jarak 200 mm sebelum melewati *porous medium*. Kontur komponen kecepatan untuk masing-masing Re ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.11 sampai 4.13.

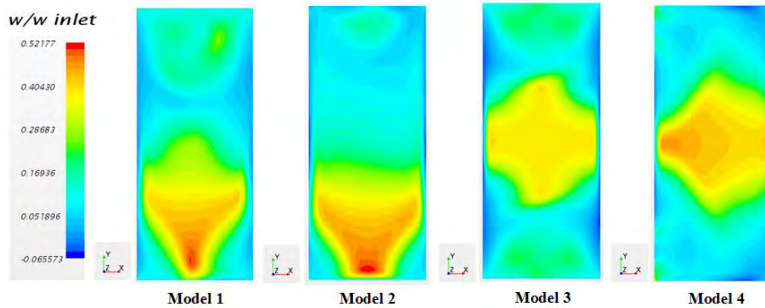


Gambar 4.11 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

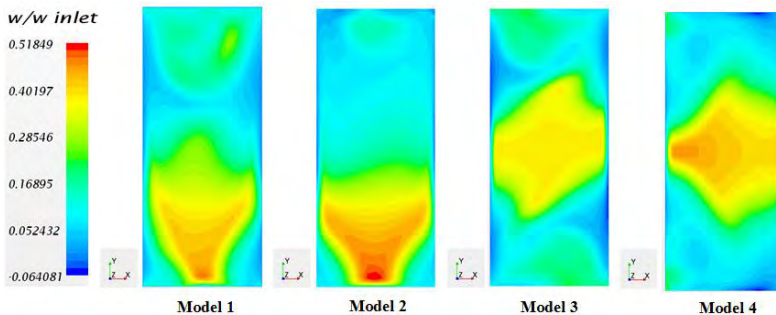
Model 1 dan 2 yang berupa *asymmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian bawah penampang, sedangkan pada model 3 dan 4 yaitu *symmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang, pada model 4 luasan kecepatan maksimum sisi kiri lebih besar daripada luasan kecepatan maksimum sisi kanan. Penampang bagian atas pada model 1 memiliki daerah berkecepatan tinggi yang lebih luas dibandingkan dengan model 2. Penampang bagian atas dan bawah pada model 3 memiliki daerah berkecepatan tinggi yang luas sedangkan penampang bagian atas dan bawah pada model 4 menunjukkan daerah berkecepatan yang lebih rendah. Untuk distribusi kecepatan di sisi dinding kiri dan kanan diantara model

1 dan model 2 terlihat model 1 memiliki daerah kecepatan rendah yang sedikit lebih luas dibandingkan dengan model 2, sedangkan diantara model 3 dan 4 terlihat model 3 memiliki daerah kecepatan rendah yang sedikit lebih luas dibandingkan dengan model 4.

Distribusi kecepatan ke arah Z pada bidang Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditunjukkan pada gambar 4.12 dan gambar 4.13 sebagai berikut.



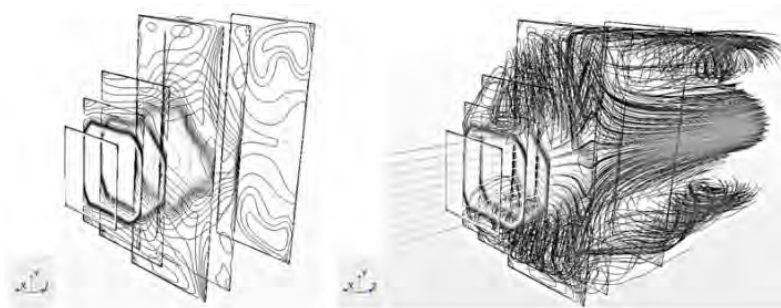
Gambar 4.12 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$



Gambar 4.13 Kontur Komponen Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Dari hasil simulasi ketiga Re menunjukkan hasil yang sedikit berbeda. Untuk model 1 dan model 2 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  luasan daerah berkecepatan maksimum lebih kecil dibandingkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$ , begitu pula pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  luasan daerah maksimum model 1 dan model 2 lebih kecil dibandingkan  $Re\ 8 \times 10^5$  dan  $Re\ 1,6 \times 10^6$ . Jika dibandingkan antara model 1 dan model 2 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  luasan berkecepatan maksimum model 1 lebih kecil dibandingkan pada model 2, sedangkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$  luasan berkecepatan maksimum model 1 hampir sama dengan model 2. Untuk model 4 luasan daerah berkecepatan maksimum terlihat semakin kecil mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ .

Pada model 4 terlihat luasan kecepatan maksimum sisi kiri dengan bentuk yang semakin mengerucut lebih besar daripada di sisi kanan baik pada  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Gambar 4.14 merupakan kontur kecepatan bidang melintang pada model 4 dari *inlet diffuser* sampai *outlet diffuser*, terlihat kontur kecepatannya ketika melewati *diffuser* aliran mengerucut pada salah satu sisi.

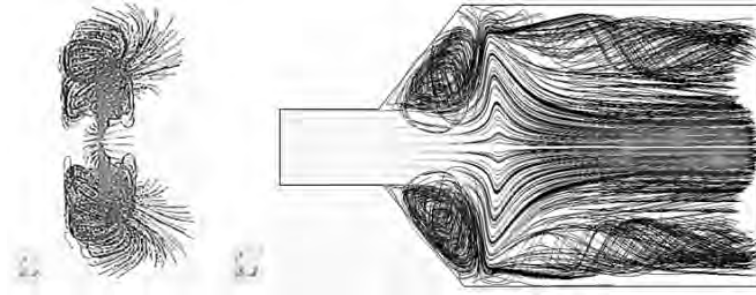


Gambar 4.14 Kontur Kecepatan ke Arah Z Tipe *Line* dan *Streamline* pada Model 4 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Gambar 4.15 menunjukkan *streamline* pada model 4 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ , terlihat ada gulungan yang lebih cenderung ke kiri, inilah yang menyebabkan kontur kecepatan pada bidang Z pada



sisi kiri cenderung mengerucut dan kecepatan maksimum berada di sisi kiri pula.

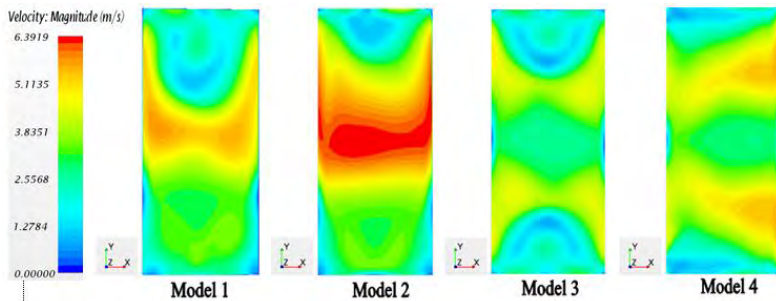


Gambar 4.15 *Streamline Model 4* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Dari gambar di atas pada bidang *midspan* bagian tengah terlihat dengan jelas gulungan yang terjadi semakin membesar setelah melewati *diffuser* sampai daerah *downstream* pada sisi kiri saja. Sedangkan pada bagian atas dan bawah juga terjadi gulungan pada daerah *downstream*.

#### 4.4.3 Analisa Kontur dan Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z

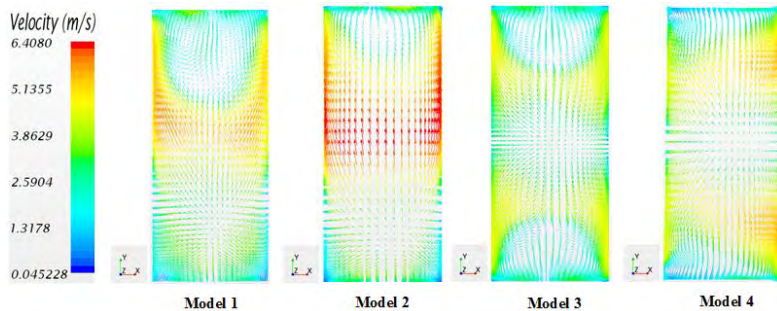
Distribusi kecepatan yang merupakan hasil simulasi dari empat model *diffuser* pada ketiga yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  divisualisasikan berupa kontur yang diambil pada bidang Z dengan jarak 200 mm sebelum *porous medium*. Kontur kecepatan untuk masing-masing  $Re$  ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.16, gambar 4.18 dan gambar 4.20. Selain kontur kecepatan juga ditampilkan vektor kecepatan pada bidang yang sama untuk masing-masing  $Re$  yang ditunjukkan pada gambar 4. 17, gambar 4.19 dan gambar 4.21.



Gambar 4.16 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

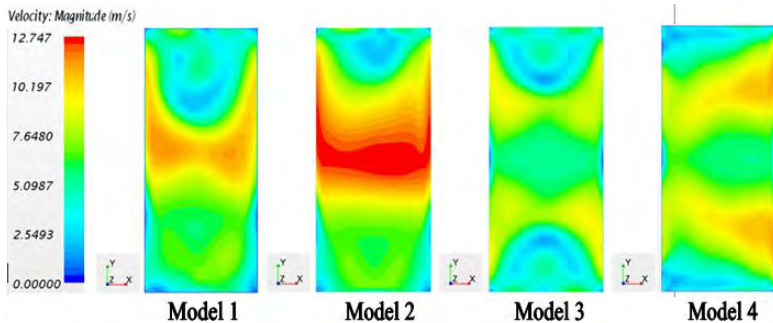
Model 1 dan 2 yang berupa *asymmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang, kecepatan maksimum pada model 2 menunjukkan lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 1. Sedangkan pada model 3 dan 4 yaitu *symmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang yang terbagi menjadi dua bagian, pada model 4 menunjukkan kecepatan maksimum lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 3, luasan kecepatan maksimum sisi kanan lebih besar daripada luasan kecepatan maksimum sisi kiri. Penampang bagian bawah pada model 1 memiliki daerah berkecepatan tinggi yang lebih luas dibandingkan dengan model 2, sedangkan penampang bagian atas terlihat model 1 memiliki luasan berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 2. Penampang bagian atas dan bawah pada model 3 memiliki daerah berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 4.

Vektor kecepatan ke arah Z pada bidang Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 8 \times 10^5$  ditampilkan pada gambar 4.17 seperti di bawah berikut, terlihat pada vektor kecepatan menampilkan arah aliran pada masing-masing model sebelum memasuki *porous medium* pada masing-masing model.



Gambar 4.17 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re \times 10^5$

Pada vektor kecepatan di atas terlihat pada model 1 dan model 2 berupa *asymmetric diffuser* terlihat aliran pada bagian bawah penampang terdefleksi ke atas dengan kecepatan yang tinggi karena adanya pengaruh *porous medium*, aliran terdefleksi ke atas sampai pada penampang bagian atas yang memiliki kecepatan rendah membentuk pusaran pada sisi tengah. Selain terdefleksi ke atas aliran juga ada yang terdefleksi ke bagian bawah dan pada dinding sisi kiri dan kanan dengan memiliki kecepatan yang rendah. Pada model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dari tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah, aliran terdefleksi ke dua arah yaitu ke atas dan ke bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang memiliki kecepatan yang rendah membentuk lengkungan. Pada model 4 yang berupa *symmetric diffuser* pula terlihat pola aliran yang cukup berbeda dengan model 3, pada bagian tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah aliran terdefleksi ke arah atas dan bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang mempunyai kecepatan rendah. Pada dinding sisi kanan terlihat luasan berkecepatan maksimum lebih luas dibandingkan pada sisi kiri, ini dikarenakan ada aliran yang menggulung pada sebagian sisi seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 4.14 dan 4.15.

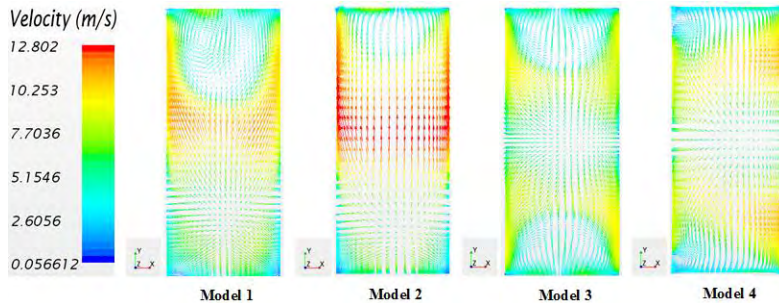


Gambar 4.18 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$

Gambar 4.18 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* sesaat sebelum melewati *porous medium* pada model 1, 2, 3 dan 4 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$ , terlihat tidak terdapat perbedaan dengan  $Re$  sebelumnya. Model 1 dan 2 yang berupa *asymmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang, kecepatan maksimum pada model 2 menunjukkan lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 1. Sedangkan pada model 3 dan 4 yaitu *symmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang yang terbagi menjadi dua bagian, pada model 4 menunjukkan kecepatan maksimum lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 3, luasan kecepatan maksimum sisi kanan lebih besar daripada luasan kecepatan maksimum sisi kiri. Penampang bagian bawah pada model 1 memiliki daerah berkecepatan tinggi yang lebih luas dibandingkan dengan model 2, sedangkan penampang bagian atas terlihat model 1 memiliki luasan berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 2. Penampang bagian atas dan bawah pada model 3 memiliki daerah berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 4.

Vektor kecepatan ke arah Z pada bidang Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  ditampilkan pada gambar 4.19 seperti di bawah berikut, terlihat pada vektor kecepatan menampilkan arah

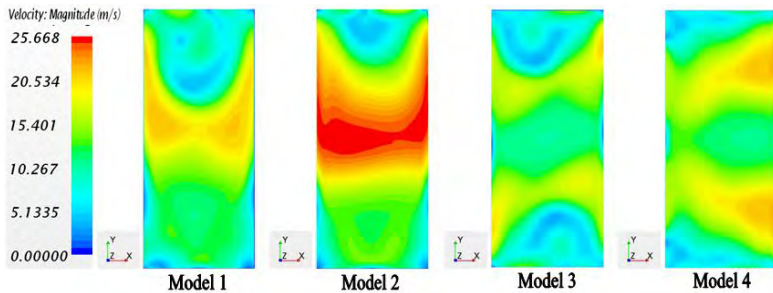
aliran pada masing-masing model sebelum memasuki *porous medium* pada masing-masing model.



Gambar 4.19 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$

Pada vektor kecepatan di atas menunjukkan hasil yang hampir sama dengan  $Re$  sebelumnya yaitu pada  $Re\ 8 \times 10^5$ . Pada model 1 dan model 2 berupa *asymmetric diffuser* terlihat aliran pada bagian bawah penampang terdefleksi ke atas dengan kecepatan yang tinggi karena adanya pengaruh *porous medium*, aliran terdefleksi ke atas sampai pada penampang bagian atas yang memiliki kecepatan rendah membentuk pusaran pada sisi tengah. Selain terdefleksi ke atas aliran juga ada yang terdefleksi ke bagian bawah dan pada dinding sisi kiri dan kanan dengan memiliki kecepatan yang rendah. Pada model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dari tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah, aliran terdefleksi ke dua arah yaitu ke atas dan ke bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang memiliki kecepatan yang rendah membentuk lengkungan. Pada model 4 yang berupa *symmetric diffuser* pula terlihat pola aliran yang cukup berbeda dengan model 3, pada bagian tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah aliran terdefleksi ke arah atas dan bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang mempunyai kecepatan rendah.

Untuk kontur kecepatan ke arah Z pada bidang Z pada jarak 200 mm sebelum *porous medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditunjukkan pada gambar 4.20 di bawah berikut. Terlihat kontur kecepatannya memiliki pola yang hampir sama dengan dua  $Re$  sebelumnya yaitu pada  $Re\ 8 \times 10^5$  dan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$ .

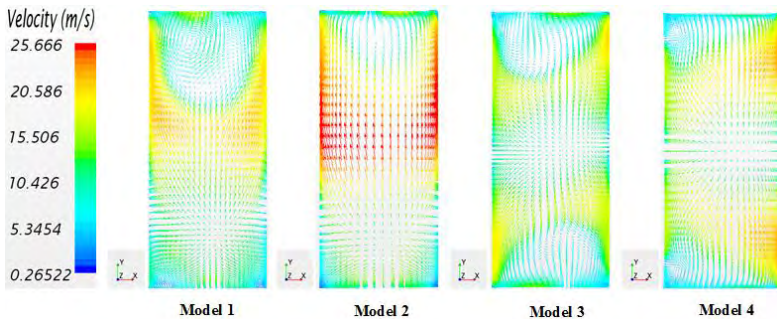


Gambar 4.20 Kontur Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Gambar 4.20 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* sesaat sebelum melewati *porous medium* pada model 1, 2, 3 dan 4 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Model 1 dan 2 yang berupa *asymmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang, kecepatan maksimum pada model 2 menunjukkan lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 1. Sedangkan pada model 3 dan 4 yaitu *symmetric diffuser* kecepatan maksimum berada pada bagian tengah penampang yang terbagi menjadi dua bagian, pada model 4 menunjukkan kecepatan maksimum lebih tinggi dibandingkan kecepatan maksimum pada model 3, luasan kecepatan maksimum sisi kanan lebih besar daripada luasan kecepatan maksimum sisi kiri. Penampang bagian bawah pada model 1 memiliki daerah berkecepatan tinggi yang lebih luas dibandingkan dengan model 2, sedangkan penampang bagian atas terlihat model 1 memiliki luasan berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 2. Penampang bagian atas dan bawah pada model 3

memiliki daerah berkecepatan rendah yang lebih luas dibandingkan pada model 4.

Vektor kecepatan ke arah Z pada bidang Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditampilkan pada gambar 4.21 seperti di bawah berikut, terlihat pada vektor kecepatan menampilkan arah aliran pada masing-masing model sebelum memasuki *porous medium* pada masing-masing model. Vektor kecepatan ini memiliki pola yang hampir sama dengan pola pada dua Re sebelumnya.



Gambar 4.21 Vektor Kecepatan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

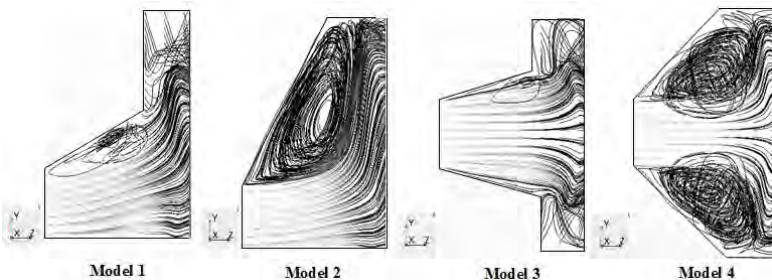
Pada vektor kecepatan di atas terlihat pada model 1 dan model 2 berupa *asymmetric diffuser* terlihat aliran pada bagian bawah penampang terdefleksi ke atas dengan kecepatan yang tinggi karena adanya pengaruh *porous medium*, aliran terdefleksi ke atas sampai pada penampang bagian atas yang memiliki kecepatan rendah membentuk pusaran pada sisi tengah. Selain terdefleksi ke atas aliran juga ada yang terdefleksi ke bagian bawah dan pada dinding sisi kiri dan kanan dengan memiliki kecepatan yang rendah. Pada model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dari tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah, aliran terdefleksi ke dua arah yaitu ke atas dan ke bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang memiliki kecepatan yang rendah membentuk



lengkungan. Pada model 4 yang berupa *symmetric diffuser* pula terlihat pola aliran yang cukup berbeda dengan model 3, pada bagian tengah penampang yang memiliki kecepatan rendah aliran terdefleksi ke arah atas dan bawah dengan kecepatan yang tinggi sampai pada bagian atas dan bawah penampang yang mempunyai kecepatan rendah.

#### 4.4.4 Analisa *Streamline* ke Arah Z

Untuk mengetahui luasan separasi yang terjadi pada masing-masing model *diffuser* pada ketiga yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  maka ditampilkan berupa *streamline* yang diambil pada bidang *midspan* yang hanya ditampilkan pada daerah *diffuser* dan *sudden enlargement*. *Streamline* untuk masing-masing  $Re$  ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.22 sampai 4.24.



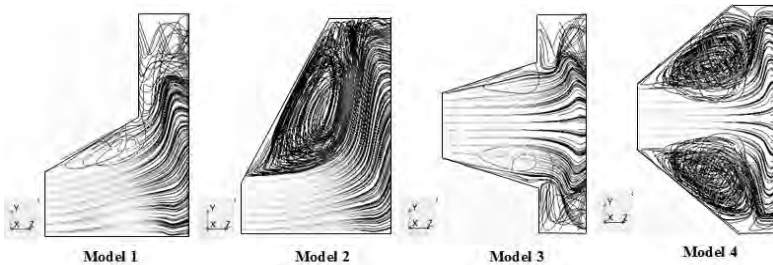
Gambar 4.22 *Streamline* ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midspan* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

Pada model 1 dan model 2 yang berupa *asymmetric diffuser* terlihat pada model 1 terjadi separasi pada bagian dinding atas *diffuser* dengan luasan yang kecil dan terjadi *vortex* pada *sudden enlargement*, pada model 2 terlihat terjadi separasi dengan luasan yang paling besar pada bagian dinding atas *diffuser*. Pada model 3 dan model 4 yang berupa *symmetric diffuser*, terlihat pada model 3 terjadi separasi pada bagian dinding atas dan dinding bawah *diffuser* dan terjadi *vortex* pada *sudden*

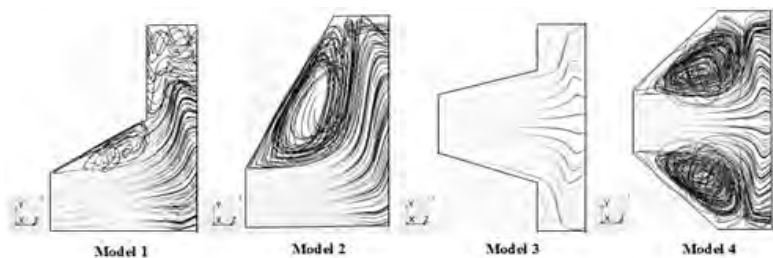


*enlargement*, pada model 4 separasi terjadi pada dua bagian yaitu pada dinding atas dan dinding bawah *diffuser* dengan luasan yang sama besar namun tidak sebesar pada model 2. Pada model 2 dan model 4 dengan bentuk *diffuser* yang berbeda, luasan separasi yang terjadi cukup besar hal ini dikarenakan sudut bukaan yang lebih besar dibandingkan sudut bukaan pada model 1 dan model 2. Dari kedua model tersebut terlihat luasan separasi terbesar terjadi pada model 2 hal ini juga dikarenakan sudut bukaan *diffuser* pada model 2 yang jauh lebih besar daripada model 4.

*Streamline* ke arah Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditunjukkan pada gambar 4.23 dan gambar 4.24 sebagai berikut.



Gambar 4.23 *Streamline* ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midsplan* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$

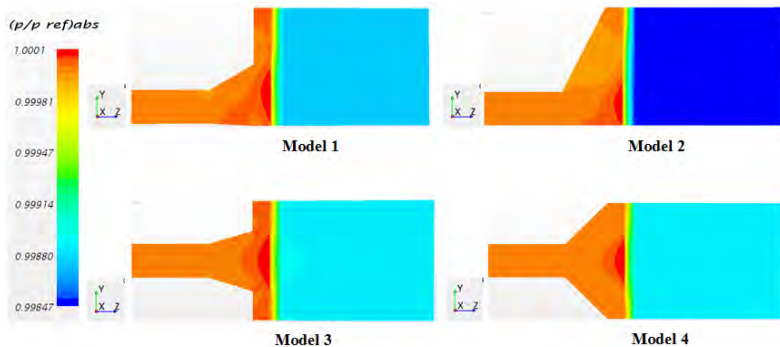


Gambar 4.24 *Streamline* ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midsplan* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Hasil simulasi secara keseluruhan menunjukkan hasil yang berbeda dengan  $Re\ 8 \times 10^5$ . Untuk model 3 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  tidak terjadi separasi pada dinding *diffuser* namun pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 8 \times 10^5$  terlihat terjadi separasi yang cukup kecil. Untuk model 2 terlihat streamline pada daerah separasi semakin merenggang mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ , selain itu terlihat daerah *vortex* pada *sudden enlargement* yang semakin mengecil dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ .

#### 4.4.5 Analisa Kontur Tekanan ke Arah Z

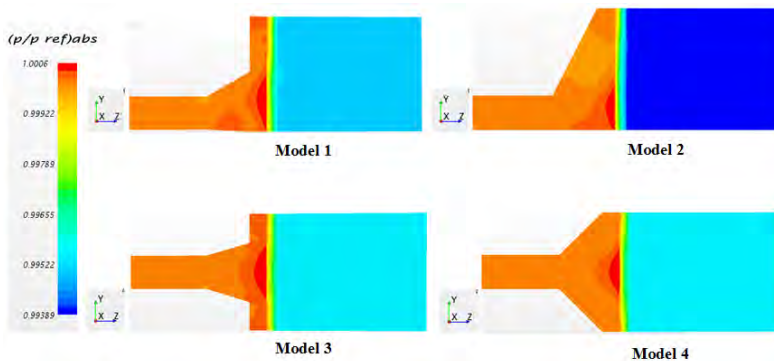
Distribusi tekanan yang dialami *flue gas* yang merupakan hasil simulasi dari empat model *diffuser* pada ketiga yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  divisualisasikan berupa kontur yang diambil pada bidang *midspan*. Kontur tekanan untuk masing-masing  $Re$  ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.25 sampai 4.27.



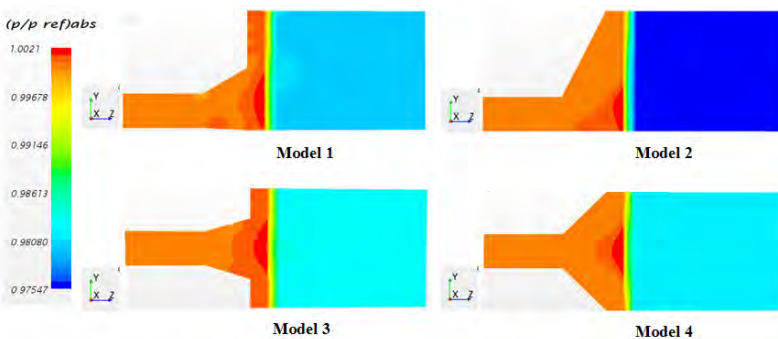
Gambar 4.25 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midspan* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

Secara umum distribusi tekanan *flue gas* pada keempat model memiliki pola yang hampir sama. Pada keempat model setelah *flue gas* memasuki *diffuser* terjadi kenaikan tekanan dikarenakan adanya pembesaran penampang, kenaikan tekanan yang terjadi cukup kecil. Setelah keluar dari *diffuser* *flue gas*

menuju *porous medium*, dengan adanya suatu tahanan inersia pada *porous medium* menyebabkan penurunan tekanan pada *flue gas*. Penurunan tekanan setelah melewati *porous medium* pada model 1 dan 2 terlihat pada model 2 tekanan setelah melewati *porous medium* lebih rendah dibanding pada model 1, sedangkan penurunan tekanan pada model 3 dan 4 terlihat hampir sama.



Gambar 4.26 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midsplan* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$

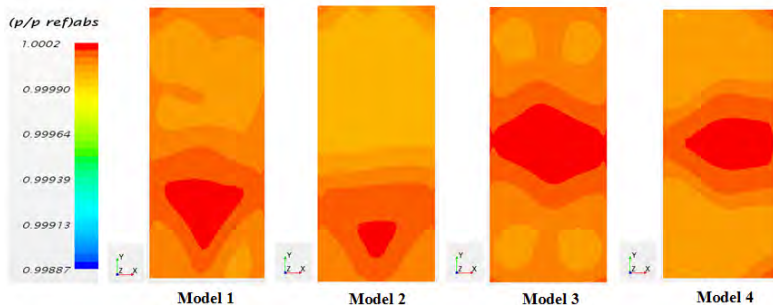


Gambar 4.27 Kontur Tekanan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Bidang *Midsplan* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Dari hasil simulasi secara keseluruhan menunjukkan hasil yang hampir sama pada ketiga Re namun terdapat sedikit perbedaan, pada model 1 terlihat terdapat cekungan kecil setelah melewati *porous medium* dan semakin membesar mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ , pada model 2 sebaliknya terdapat cekungan besar setelah melewati *porous medium* dan semakin mengecil seiring kenaikan Re.

#### 4.4.6 Analisa Kontur Tekanan ke Arah Z

Distribusi tekanan *flue gas* sesaat sebelum melewati *porous medium* pada model 1, 2, 3 dan 4 untuk ketiga Re yaitu  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$ , divisualisasikan berupa kontur tekanan yang diambil pada bidang Z dengan jarak 200 mm sebelum melewati *porous medium*. Kontur tekanan untuk masing-masing Re ditunjukkan secara berurutan yaitu pada gambar 4.28 sampai 4.30.

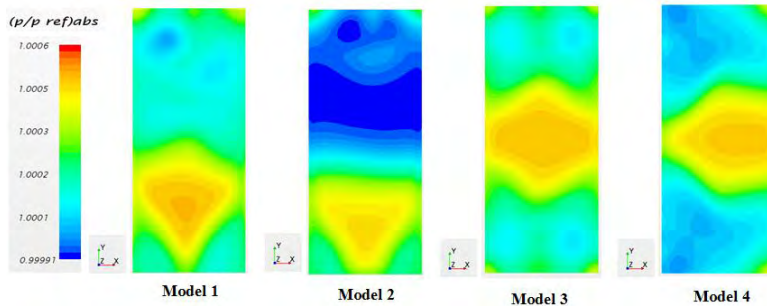


Gambar 4.28 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 8 \times 10^5$

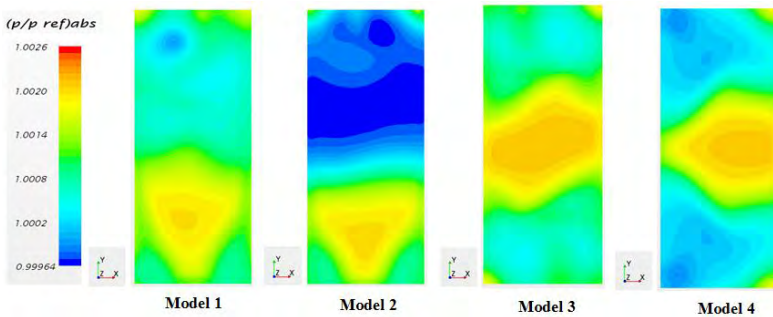
Pada model 1 dan 2 *asymmetric diffuser* terlihat tekanan maksimum terjadi pada bagian bawah penampang, pada model 1 terlihat luasan bertekanan maksimum lebih besar daripada model 2. Pada bagian atas hingga ke tengah penampang model 2 memiliki tekanan yang lebih rendah dibanding pada model 1. Pada model 3 dan 4 *symmetric diffuser* tekanan maksimum terjadi

dibagian tengah penampang, pada model 3 terlihat luasan bertekanan maksimum lebih besar daripada model 4. Pada bagian atas dan bawah penampang model 4 didominasi oleh tekanan rendah.

Distribusi tekanan ke arah Z model 1, 2, 3, dan 4 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditunjukkan pada gambar 4.29 dan gambar 4.30 yang menunjukkan adanya perbedaan dari masing-masing  $Re$ .



Gambar 4.29 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$



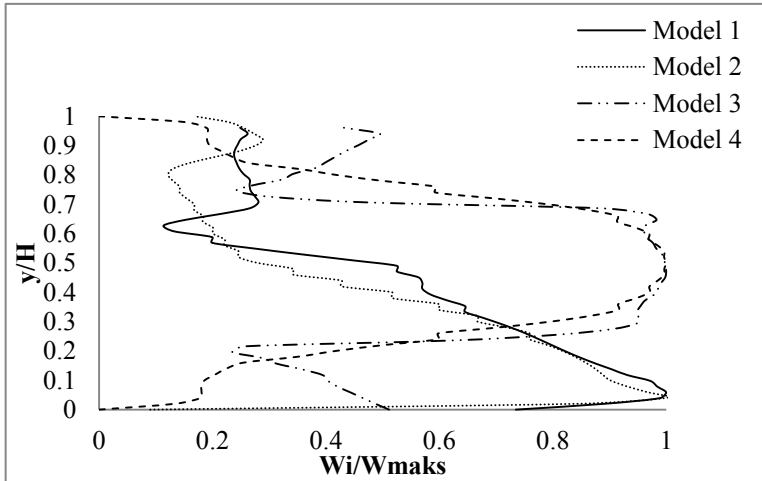
Gambar 4.30 Kontur Tekanan ke Arah Z pada Bidang Z pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Kontur tekanan ke arah Z pada ketiga Re menunjukkan hasil yang berbeda. Pada model 1 seiring kenaikan Re mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$  luasan bertekanan maksimum semakin mengecil dan penampang bagian atas semakin seragam. Pada  $Re\ 8 \times 10^5$  penampang bagian atas model 2 dan model 4 terlihat lebih seragam dibandingkan kedua Re lainnya, Pada model 3 daerah berkecepatan maksimum memiliki bentuk yang berbeda-beda untuk masing-masing Re, pada  $Re\ 8 \times 10^5$  daerah berkecepatan maksimum membentuk jajar genjang yang cenderung serong ke kiri, pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  berbentuk belah ketupat sedangkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  berbentuk jajar genjang yang cenderung serong ke kanan serta penampang bagian atas dan bawah terlihat lebih seragam dibandingkan dua Re lainnya.

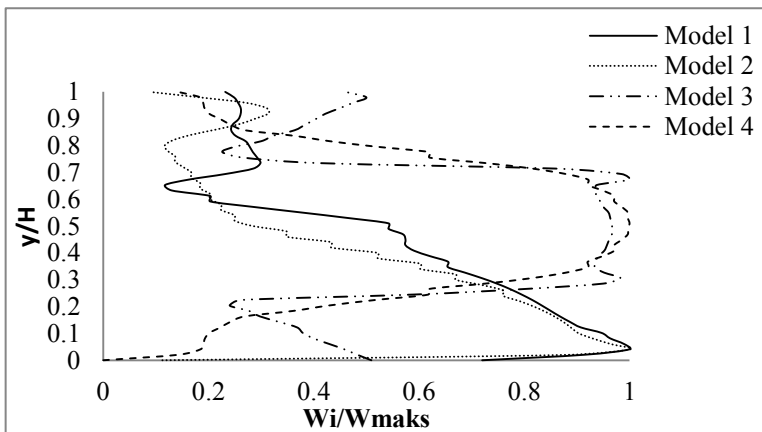
#### 4.5 Analisa Kuantitatif

Data kuantitatif diperlukan untuk menentukan distribusi kecepatan yang paling seragam dan distribusi tekanan yang optimal diantara keempat model, selain sebagai pendukung data kualitatif yang telah dianalisa sebelumnya. Data kuantitatif pada penelitian ini yang meliputi RMS, *pressure recovery coefficient* ( $C_{p_r}$ ) dan *pressure loss coefficient* (K).

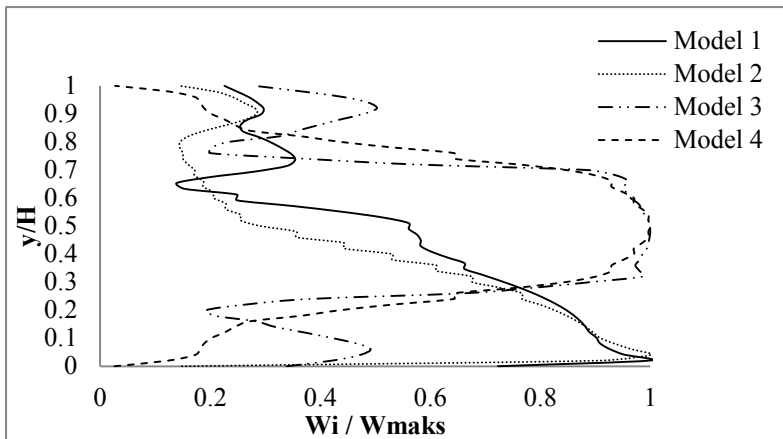
Untuk mengetahui distribusi kecepatan yang paling seragam maka perlu dibandingkan profil kecepatan dari 4 model dengan masing-masing Re. Perbandingan profil kecepatan model 1, 2, 3 dan 4 pada  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$  ditunjukkan pada gambar 4.31 sampai gambar 4.33 .



Gambar 4.31 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re$   $8 \times 10^5$



Gambar 4.32 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re$   $1,6 \times 10^6$



Gambar 4.33 Perbandingan Profil Kecepatan ke Arah Z Model 1, 2, 3 dan 4 pada Jarak 200 mm Sebelum *Porous Medium* pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$

Gambar 4.31 sampai gambar 4.33 menunjukkan perbandingan profil kecepatan model 1, 2, 3 dan 4 pada ketiga  $Re$ . Pada bentuk *asymmetric diffuser* yaitu model 1 dan model 2, terlihat model 1 dengan satu *sudden enlargement* yang ditunjukkan oleh garis *solid* memiliki profil kecepatan yang lebih seragam dibandingkan dengan model 2 yang ditunjukkan dengan garis titik-titik. Pada bentuk *symmetric diffuser* yaitu model 3 dan model 4, terlihat model 3 dengan dua *sudden enlargement* yang ditunjukkan oleh garis *dash dot* memiliki profil kecepatan yang lebih seragam dibandingkan dengan model 4 yang ditunjukkan dengan garis putus - putus. Diantara model 1 dan model 3 belum dapat dibandingkan keseragaman profil kecepataannya karena model 1 dan model 3 memiliki bentuk *diffuser* yang berbeda, selain itu pengamatan secara visual dari grafik di atas sulit dilakukan karena profil kecepataannya sangat berbeda. Maka perlu dirumuskan yang menghasilkan suatu angka yaitu dengan menggunakan *Root Mean Square* (RMS).



#### 4.5.1 Analisa RMS (*Root Mean Square*)

Setelah melewati *porous medium* kebanyakan *flue gas* sudah menjadi lebih *uniform*, untuk mengukur tingkat keseragaman (*uniform*) dari *flue gas* digunakan metode RMS. Dimana RMS ini menunjukkan standar deviasi dari kecepatan *flue gas*. Semakin kecil nilai RMS, menunjukkan keseragaman yang semakin bagus karena penyebaran kecepatan semakin mengecil. Pengukuran RMS dilakukan pada penampang Z dengan jarak 200 mm sebelum memasuki *porous medium* diambil sampel aliran pada titik tengah HRSG.

Dari hasil perhitungan didapat nilai RMS untuk masing-masing Re yang ditunjukkan pada tabel 4.6

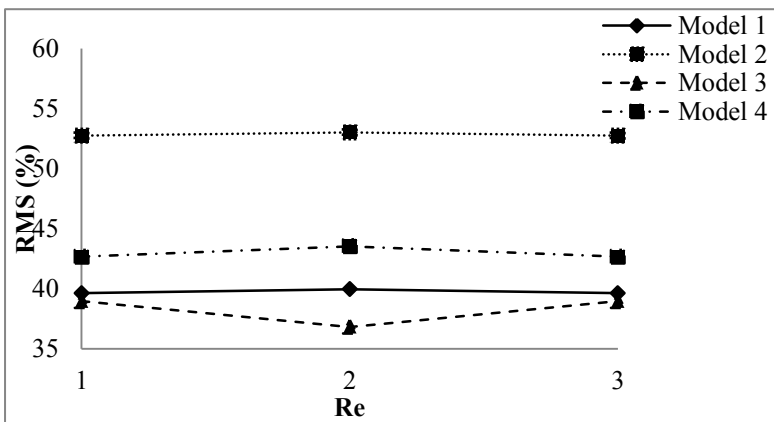
Tabel 4.6 Nilai RMS 4 Model pada Masing-masing Re

RMS	Re $8 \times 10^5$	Re $1,6 \times 10^6$	Re $3,2 \times 10^6$
<b>Model 1</b>	39,91%	39,97%	39,63%
<b>Model 2</b>	53,32%	53%	52,73%
<b>Model 3</b>	36,86%	36,82%	38,97%
<b>Model 4</b>	43,79%	43,53%	42,67%

Dari tabel 4.6 dapat diketahui nilai RMS keempat model dengan masing-masing Re. Dari ketiga Re nilai RMS terkecil hingga terbesar secara berurutan dimiliki pada model 3-1-4-2. Untuk bentuk *asymmetric diffuser* nilai RMS terkecil dimiliki oleh model 1, sedangkan untuk bentuk *symmetric diffuser* nilai RMS terkecil dimiliki oleh model 3, dikarenakan baik pada model 1 dan model 3 memiliki sudut bukaan yang lebih kecil dibandingkan pada model 2 dan 4 meskipun berbeda bentuk *diffuser*. Nilai RMS terkecil pada masing-masing Re yang

dimiliki oleh model 3 bernilai 36,86% pada  $Re\ 8 \times 10^5$ , 36,82% pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan 38,97% pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Sedangkan nilai RMS terbesar pada masing-masing  $Re$  yang dimiliki oleh model 2 bernilai 53,32% pada  $Re\ 8 \times 10^5$ , 53%, pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan 52,73% pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Berdasarkan nilai RMS dapat disimpulkan kecepatan yang paling seragam dimiliki oleh model 3, sedangkan yang paling tidak seragam dimiliki oleh model 2.

Nilai RMS pada ketiga  $Re$  dengan model yang sama menunjukkan nilai yang berbeda-beda ada yang terjadi kenaikan nilai RMS dan ada yang terjadi penurunan nilai RMS, hubungan nilai RMS terhadap  $Re$  ditampilkan pada grafik nilai RMS pada masing-masing  $Re$  yang ditunjukkan pada gambar 4.34 sebagai berikut.



Gambar 4.34 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai  $Re$  terhadap Nilai RMS pada Model 1, 2, 3 dan 4

Gambar 4.34 menunjukkan grafik perbandingan nilai RMS keempat model pada ketiga  $Re$  terlihat *trendline* grafik pada model 1, 2 dan 4 menunjukkan penurunan sedangkan pada model 3 *trendline* grafik mengalami kenaikan. RMS yang paling tinggi dimiliki oleh model 2 dan RMS paling rendah dimiliki oleh model 3.

Dari grafik di atas terlihat untuk model 1 nilai RMS mengalami kenaikan dan penurunan mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Nilai RMS terkecil model 1 yang ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  adalah 39,63% dan nilai RMS terbesar yang ditunjukkan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  adalah 39,97%.

Untuk model 2 dilihat dari grafik nilai RMS terlihat adanya penurunan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Nilai RMS terkecil model 2 ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  sebesar 52,73% dan nilai RMS terbesar pada  $Re\ 8 \times 10^5$  sebesar 53,32%.

Nilai RMS pada model 3 mengalami penurunan dan kenaikan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Nilai RMS terkecil model 3 yang ditunjukkan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  adalah 36,82% dan nilai RMS terbesar yang ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  adalah 38,97%.

Nilai RMS pada model 4 mengalami penurunan dan kenaikan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . RMS terkecil pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  yaitu 42,67% dan terbesar pada  $Re\ 8 \times 10^5$  yaitu 43,79%. Dari *trendline* di atas dapat diketahui dari 4 model, 3 model diantaranya menunjukkan hubungan nilai RMS dengan kenaikan  $Re$  yaitu semakin meningkatnya  $Re$  maka nilai RMS semakin turun, hanya 1 model saja yang mengalami kenaikan nilai RMS.

Dari nilai RMS didapat bahwa model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* lebih optimum daripada kedua eksisting yaitu model 1 dan model 2. Model 3 memiliki nilai RMS yang lebih kecil dibandingkan model 1, perbedaan nilai RMS antara model 3 dan model 1 sebesar 1,66% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Model 1 dan model 2 yang berupa eksisting dapat diketahui model 1 memiliki nilai RMS yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan model 2, perbedaan nilai RMS antara model 3 dan model 1 sebesar 24,8% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ .

#### 4.5.2 Analisa *Pressure coefficient recovery* ( $C_{p_r}$ )

*Pressure recovery coefficient* ( $C_{p_r}$ ) digunakan untuk menyatakan performa suatu *diffuser*. Harga  $C_{p_r}$  maksimum pada *outlet diffuser* menyatakan seberapa besar kemampuan suatu *diffuser* dengan geometri tertentu dan kondisi operasi tertentu untuk meningkatkan tekanan dengan cara memperlambat kecepatan aliran fluida yang mengalir di dalamnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar  $C_{p_r}$  maka semakin baik performa dari *diffuser* tersebut.

Maka untuk mengetahui bagaimana performa *diffuser* pada keempat model perlu dilakukan pengukuran nilai  $C_{p_r}$ . Berikut nilai  $C_{p_r}$  dari keempat model dengan ketiga  $Re$  yang ditunjukkan pada tabel 4.7.

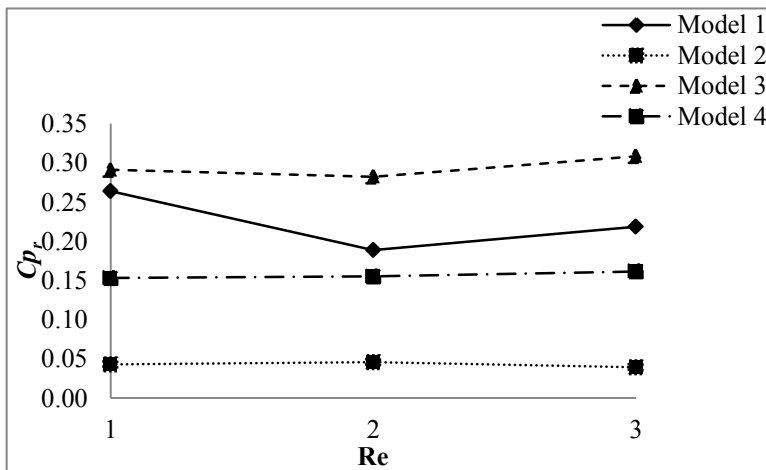
Tabel 4.7 Nilai  $C_{p_r}$  4 Model pada Masing-masing  $Re$

$C_{p_r}$	$Re\ 8 \times 10^5$	$Re\ 1,6 \times 10^6$	$Re\ 3,2 \times 10^6$
<b>Model 1</b>	0,264	0,189	0,219
<b>Model 2</b>	0,043	0,046	0,039
<b>Model 3</b>	0,291	0,283	0,309
<b>Model 4</b>	0.153	0.155	0.162

Dari tabel 4.7 di atas dapat diketahui nilai  $C_{p_r}$  dari keempat model dengan masing-masing  $Re$ . Dari ketiga  $Re$  nilai  $C_{p_r}$  terbesar hingga terkecil secara berurutan dimiliki pada model 3-1-4-2. Untuk bentuk *asymmetric diffuser* nilai  $C_{p_r}$  terbesar dimiliki oleh model 1, sedangkan untuk bentuk *symmetric diffuser* nilai  $C_{p_r}$  terbesar dimiliki oleh model 3, ini dikarenakan baik pada model 1 dan model 3 memiliki sudut bukaan yang lebih kecil dibandingkan pada model 2 dan 4 meskipun berbeda bentuk *diffuser*. Nilai  $C_{p_r}$  terbesar pada masing-masing  $Re$  yang dimiliki

oleh model 3 bernilai 0,291 pada  $Re\ 8 \times 10^5$ , 0,283 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan 0,309 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Sedangkan nilai  $Cp_r$  terkecil pada masing-masing  $Re$  yang dimiliki oleh model 2 bernilai 0,043 pada  $Re\ 8 \times 10^5$ , 0,046 pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan 0,039 pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Berdasarkan nilai  $Cp_r$  dapat disimpulkan performa *diffuser* yang paling baik dimiliki oleh model 3 sedangkan performa *diffuser* yang paling buruk dimiliki oleh model 2.

Nilai  $Cp_r$  pada ketiga  $Re$  dengan model yang sama menunjukkan nilai yang berbeda-beda ada yang terjadi kenaikan nilai  $Cp_r$  dan ada yang terjadi penurunan nilai  $Cp_r$ . Maka hubungan nilai  $Cp_r$  terhadap  $Re$  ditampilkan pada grafik nilai  $Cp_r$  pada masing-masing  $Re$  yang ditunjukkan pada gambar 4.29 sebagai berikut.



Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai  $Re$  terhadap Nilai  $Cp_r$  pada Model 1, 2, 3 dan 4

Gambar 4.35 menunjukkan grafik perbandingan nilai  $Cp_r$  keempat model pada ketiga  $Re$  terlihat *trendline* grafik pada model 1, 3 dan 4 menunjukkan adanya kenaikan sedangkan pada model 2 *trendline* grafik mengalami penurunan.  $Cp_r$  yang paling

tinggi dimiliki oleh model 3 dan  $C_{p_r}$  paling rendah dimiliki oleh model 2.

Dari grafik di atas untuk model 1 nilai  $C_{p_r}$  mengalami penurunan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  ke  $Re\ 1,6 \times 10^6$  kemudian pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  nilai  $C_{p_r}$  mengalami kenaikan. Nilai  $C_{p_r}$  terkecil model 1 ditunjukkan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  yaitu 0,189 dan nilai  $C_{p_r}$  terbesar ditunjukkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$  yaitu 0,264.

Untuk model 2 nilai  $C_{p_r}$  mengalami kenaikan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  ke  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  nilai  $C_{p_r}$  mengalami penurunan. Nilai  $C_{p_r}$  terkecil model 2 ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  yaitu 0,039 dan nilai  $C_{p_r}$  terbesar ditunjukkan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  yaitu 0,046.

Pada model 3 nilai  $C_{p_r}$  mengalami penurunan dari  $Re\ 8 \times 10^5$  ke  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  nilai  $C_{p_r}$  mengalami kenaikan. Nilai  $C_{p_r}$  terkecil model 3 ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  yaitu 0,039 dan nilai  $C_{p_r}$  terbesar ditunjukkan pada  $Re\ 1,6 \times 10^6$  yaitu 0,046.

Nilai  $C_{p_r}$  pada model 4 mengalami kenaikan mulai dari  $Re\ 8 \times 10^5$  hingga  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Nilai  $C_{p_r}$  terkecil pada model 4 yang ditunjukkan pada  $Re\ 8 \times 10^5$  adalah 0,153 dan terbesar ditunjukkan pada  $Re\ 3,2 \times 10^6$  adalah 0,162. Dari *trendline* grafik di atas tidak dapat diketahui hubungan nilai  $C_{p_r}$  dengan kenaikan nilai  $Re$  karena nilai  $C_{p_r}$  yang sangat fluktuatif pada masing-masing  $Re$ .

Dari nilai  $C_{p_r}$  didapat bahwa model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* lebih optimum daripada kedua eksisting yaitu model 1 dan model 2. Model 3 memiliki nilai  $C_{p_r}$  yang lebih besar dibandingkan model 1, perbedaan nilai  $C_{p_r}$  antara model 3 dan model 1 sebesar 29,1% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Model 1 dan model 2 yang berupa eksisting diketahui model 1 memiliki nilai  $C_{p_r}$  yang jauh lebih besar dibandingkan dengan model 2, perbedaan nilai  $C_{p_r}$  antara model 3 dan model 1 sebesar 82,19% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ .

#### 4.5.3 Analisa *Pressure Loss Coefficient* (K)

Untuk mengetahui distribusi tekanan yang paling optimal dari keempat model *diffuser*, maka perlu membandingkan kondisi ideal model dengan kondisi aktual model atau hasil dari simulasi. Model dapat dikatakan optimal apabila nilai kondisi aktual sama atau mendekati dengan kondisi idealnya, maka nilai *pressure loss coefficient* (K) atau koefisien kehilangan tekanan harus sekecil mungkin untuk mendapatkan model yang optimum.

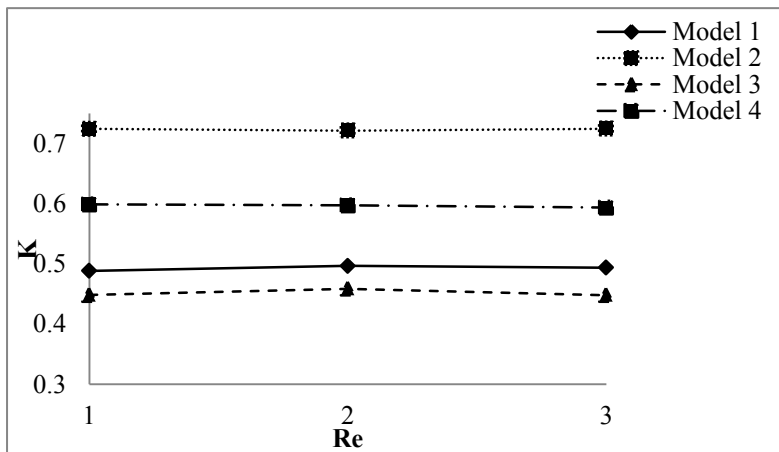
Tabel 4.8 Nilai *Pressure Loss Coefficient* (K) 4 Model pada Masing-masing Re

K	Re $8 \times 10^5$	Re $1,6 \times 10^6$	Re $3,2 \times 10^6$
<b>Model 1</b>	0.488	0.496	0.494
<b>Model 2</b>	0.724	0.721	0.725
<b>Model 3</b>	0.448	0.458	0.448
<b>Model 4</b>	0.599	0.597	0.593

Dari tabel 4.8 dapat diketahui nilai K dari keempat model dengan masing-masing Re. Dari ketiga Re nilai K terkecil hingga terbesar secara berurutan dimiliki pada model 3-1-4-2. Untuk bentuk *asymmetric diffuser* nilai K terkecil dimiliki oleh model 1, sedangkan untuk bentuk *symmetric diffuser* nilai K terkecil dimiliki oleh model 3, dikarenakan baik pada model 1 dan model 3 memiliki sudut bukaan yang lebih kecil dibandingkan pada model 2 dan 4 meskipun berbeda bentuk *diffuser*. Nilai K terkecil pada masing-masing Re yang dimiliki oleh model 3 bernilai 0,448 pada Re  $8 \times 10^5$ , 0,458 pada Re  $1,6 \times 10^6$  dan 0,448 pada Re  $3,2 \times 10^6$ . Sedangkan nilai K terbesar pada masing-masing Re yang dimiliki oleh model 2 bernilai 0,724 pada Re  $8 \times 10^5$ , 0,721 pada Re  $1,6 \times 10^6$  dan 0,725 pada Re  $3,2 \times 10^6$ . Berdasarkan nilai K dapat disimpulkan model *diffuser* yang paling optimal dimiliki oleh

model 3 sedangkan model *diffuser* yang paling tidak optimal dimiliki oleh model 2.

Nilai K pada ketiga Re dengan model yang sama menunjukkan nilai yang berbeda-beda ada yang terjadi kenaikan nilai K dan ada yang terjadi penurunan nilai K. Maka hubungan nilai K terhadap Re ditampilkan pada grafik nilai K pada masing-masing Re yang ditunjukkan pada gambar 4.36 sebagai berikut.



Gambar 4.36 Grafik Perbandingan Kenaikan Nilai Re terhadap Nilai K pada Model 1, 2, 3 dan 4

Gambar 4.36 menunjukkan grafik perbandingan nilai K keempat model pada ketiga Re terlihat *trendline* grafik pada keempat model cenderung datar, karena penurunan dan kenaikan yang terjadi tidak terlalu signifikan, sehingga *trendline* menjadi terlihat datar. Nilai K yang paling tinggi dimiliki oleh model 2 dan nilai K yang paling rendah dimiliki oleh model 3.

Untuk model yang sama memiliki nilai *pressure loss coefficient* (K) yang fluktuatif pula mengalami penurunan serta kenaikan dari  $Re \ 8 \times 10^5$  hingga  $Re \ 8 \times 10^5$  namun kenaikan dan penurunan dari masing-masing model tidak terlalu signifikan, penurunan dan kenaikannya sangat kecil, hal ini juga



ditunjukkan pada *trendline* grafik yang berhimpit antara  $Re\ 8 \times 10^5$ ,  $Re\ 1,6 \times 10^6$  dan  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Maka dapat diketahui tidak ada pengaruh kenaikan  $Re$  terhadap nilai *pressure loss coefficient* ( $K$ ).

Dari nilai  $K$  didapat bahwa model 3 yang berupa *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* lebih optimum daripada kedua eksisting yaitu model 1 dan model 2. Model 3 memiliki nilai  $K$  yang lebih kecil dibandingkan model 1, perbedaan nilai  $K$  antara model 3 dan model 1 sebesar 9,3% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ . Model 1 dan model 2 yang berupa eksisting diketahui model 1 memiliki nilai  $K$  yang lebih besar dibandingkan dengan model 2, perbedaan nilai  $K$  antara model 3 dan model 1 sebesar 31,86% pada kondisi  $Re\ 3,2 \times 10^6$ .

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan nilai RMS kecepatan aliran *flue gas* yang paling *uniform* pada jarak 200mm sebelum melewati *porous medium* adalah model 3 yaitu *symmetric diffuser* dengan dua *sudden enlargement* ( $2\theta=33,4^\circ$ ) sedangkan yang paling tidak seragam adalah model 2 yaitu *asymmetric diffuser* ( $\theta_1=62,66^\circ$ ,  $\theta_2=0^\circ$ )
2. Berdasarkan nilai  $C_{p_r}$ , performa *diffuser* yang paling baik dimiliki oleh model 3, sedangkan performa *diffuser* yang paling buruk dimiliki oleh model 2
3. Model *diffuser* yang mempunyai nilai K paling rendah adalah model 3, sedangkan model *diffuser* yang mempunyai nilai K paling tinggi adalah model 2
4. Kenaikan bilangan *Reynolds* tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai RMS,  $C_{p_r}$  dan K.
5. Bentuk *diffuser* yang paling optimum yang dapat diaplikasikan pada *inlet duct* HRSG adalah model 3.
6. Dari bentuk eksisting yang ada model 1 memiliki *losses* yang lebih tinggi 9,3% dan *uniformity* RMS lebih tinggi 1,66% dibandingkan dengan model 3, sedangkan model 2 memiliki *losses* yang lebih tinggi 31,86% dan *uniformity* RMS lebih tinggi 24,8% dibandingkan dengan model 3

#### **5.2 Saran**

Beberapa saran yang diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Memiliki referensi berupa data eksperimen agar dapat dijadikan validasi data yang telah diperoleh dari studi numerik.
2. Untuk simulasi pada *diffuser* sebaiknya menggunakan sudut divergensi yang kecil yaitu pada daerah *no stall*, karena ketika sudut divergensi besar maka hasilnya pun tidak optimal, separasi dan *pressure loss coefficient*nya besar.
3. Untuk aplikasi HRSG maka *porous medium* yang digunakan disesuaikan berdasarkan data *heat exchanger*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Fox, Robert W., Mc Donald, Alan T. and Pritchard, Philip J. 2010. "Introduction to Fluid Mechanics", 7<sup>th</sup> edition. John Wiley and Sons, New York.
- Hedge, N., Han, I. and Roy, R.P. 2007. "Flow and Heat Transfer in Heat Recovery Steam Generators". Transactions of the ASME, vol.129, pp. 232-242.
- Klistafani, Yiyin. 2012. "Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik Boundary Layer Turbulen di Dalam Asymmetric 3D Flat-Walled Diffuser dengan Aspect Ratio Konstan". Tugas Akhir. Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Param, H., Moghari, Motjaba. and Niknahad, P. 2011. "Hydrodynamic Analysis Of Flue Gas Flow Behavior Within A Heat Recovery Steam Generator". MapnaBoiler Company, Iran.
- Wang, Y., Hsu, J. and Lee, Y. 2008. "Loss Characteristics and Flow Rectification Property of Diffuser Valves for Micropump Applications". International Journal of Heat Mass Transfer, vol.5 no.2, pp. 328-336.
- Wardhana, Bayu Kusuma. 2014. "Studi Numerik Variasi Inlet Duct pada Heat Recovery Steam Generator". Tugas Akhir. Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- White, Frank M. 2001. "Fluid Mechanics", 4<sup>th</sup> edition. McGraw Hill, New York.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

**Tabel *Cpr* Re  $8 \times 10^5$**

	<b><i>P Inlet Diffuser (Pa)</i></b>	<b><i>P Outlet Diffuser (Pa)</i></b>	<b><i>V Inlet Diffuser (m/s)</i></b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><i>Cpr</i></b>
<b>Model 1</b>	-6.701	-2.629	6.643	0.699	0.264
<b>Model 2</b>	-4.925	-4.273	6.582		0.043
<b>Model 3</b>	-9.489	-4.983	6.654		0.291
<b>Model 4</b>	-4.389	-2.061	6.593		0.153

**Tabel *Cpr* Re  $1,6 \times 10^6$**

	<b><i>P Inlet Diffuser (Pa)</i></b>	<b><i>P Outlet Diffuser (Pa)</i></b>	<b><i>V Inlet Diffuser (m/s)</i></b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><i>Cpr</i></b>
<b>Model 1</b>	-23.476	-11.826	13.285	0.699	0.189
<b>Model 2</b>	-20.142	-17.362	13.162		0.046
<b>Model 3</b>	-36.632	-19.148	13.307		0.283
<b>Model 4</b>	-16.863	-7.425	13.185		0.155

**Tabel *Cpr* Re  $3,2 \times 10^6$** 

	<b>P Inlet Diffuser (Pa)</b>	<b>P Outlet Diffuser (Pa)</b>	<b>V Inlet Diffuser (m/s)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><i>Cpr</i></b>
<b>Model 1</b>	-89.365	-35.374	26.570	0.699	0.219
<b>Model 2</b>	-81.447	-71.935	26.325		0.039
<b>Model 3</b>	-168.319	-91.923	26.613		0.309
<b>Model 4</b>	-66.456	-27.204	26.371		0.162

**Tabel *Pressure loss coefficient* Re  $8 \times 10^5$** 

	<b>V1 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V3 (m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\alpha_1</math></b>	<b><math>\alpha_3</math></b>	<b>P3</b>	<b>P1</b>	<b>K</b>
<b>Model 1</b>	6.726	1.288	1.0017512	1.0000	0.802892	-6.70784	0.490
<b>Model 2</b>	6.726	1.288	1.0017946	1.0000	-1.00092	-4.77883	0.726
<b>Model 3</b>	6.726	1.288	1.0017807	1.0000	-1.44332	-9.58675	0.450
<b>Model 4</b>	6.726	1.288	1.0017673	1.0000	1.383255	-4.38333	0.600

**Tabel *Pressure loss coefficient* Re  $1,6 \times 10^6$** 

	<b>V1 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V3 (m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\alpha_1</math></b>	<b><math>\alpha_3</math></b>	<b>P3</b>	<b>P1</b>	<b>K</b>
<b>Model 1</b>	13.45014	2.575	1.0000	1.000	5.995136	-23.5223	0.496
<b>Model 2</b>	13.44995	2.575	1.0000	1.000	-4.24622	-19.5485	0.721
<b>Model 3</b>	13.44994	2.575	1.0000	1.000	-5.10062	-37.0213	0.458
<b>Model 4</b>	13.45041	2.575	0.9999	1.000	6.323901	-16.8312	0.597

**Tabel *Pressure loss coefficient* Re  $3,2 \times 10^6$** 

	V1 (m <sup>2</sup> )	V3 (m <sup>2</sup> )	$\alpha_1$	$\alpha_3$	P3	P1	K
<b>Model 1</b>	26.9003	5.150	1.0000	1.000	28.92209	-89.8336	0.494
<b>Model 2</b>	26.89992	5.150	1.0000	1.000	-18.6564	-79.0333	0.725
<b>Model 3</b>	26.89972	5.150	1.0000	1.000	-39.6126	-169.942	0.448
<b>Model 4</b>	26.90065	5.150	0.9999	1.000	27.23089	-66.3155	0.593



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Crytelana Radios Catur Putri dilahirkan di Jakarta, 4 Januari 1993 merupakan anak pertama dari 4 bersaudara dari pasangan Catur Bagianto dan Pujiati. Penulis memulai pendidikan formal di TK Anugerah Tulungagung, SDN Bago 1 Tulungagung, SMPN 1 Tulungagung kemudian melanjutkan ke SMAN 1 Boyolangu Tulungagung dengan jurusan IPA. Setelah lulus dari SMA tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikannya di salah satu perguruan

tinggi terbaik di Indonesia yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengambil jurusan Teknik Mesin FTI-ITS terdaftar dengan NRP 2111100017, dan memperoleh gelar Sarjana pada bulan September 2015.

Di jurusan Teknik Mesin penulis mengambil bidang studi konversi energi. Semasa kuliah penulis aktif dalam berbagai kegiatan baik kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis pernah menjadi asisten dan grader praktikum Perpindahan Panas, asisten Termodinamika, dan grader Metalurgi. Organisasi kemahasiswaan yang pernah diikuti yaitu Himpunan Mahasiswa Mesin sebagai bendahara BSO *Event* Besar, selain itu penulis juga pernah berpartisipasi dalam kegiatan pelatihan manajemen dan *leadership* di ITS, serta berbagai kepanitiaan yaitu IEMC 2012, IEMC 2013 dan Mechanical City.

Penulis dapat dihubungi melalui email berikut :  
crytelana.rcputri@yahoo.com

\

*Halaman ini sengaja dikosongkan*